

Autoreferat

1. Imię i nazwisko

Adam Marek Wojciechowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2002 - 2007 stopień magistra fizyki, Uniwersytet Jagielloński, Instytut Fizyki
praca magisterska pt. „Magnetometr atomowy” obroniona z wyróżnieniem,
opiekun: prof. dr hab. Wojciech Gawlik

2007 - 2011 stopień doktora nauk fizycznych, Uniwersytet Jagielloński, Wydział Fizyki,
Astronomii i Informatyki Stosowanej
praca doktorska pt. "Koherencje kwantowe w zimnych atomach" obroniona z
wyróżnieniem, za tę pracę Minister NiSW przyznał mi Nagrodę indywidualną II st.
promotor: prof. dr hab. Wojciech Gawlik

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

od 2018 do obecnie – adiunkt – Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński (UJ)

w latach 2015-2017 – staż podoktorski (post-doc) – Wydział Fizyki, Duński Uniwersytet Techniczny (DTU), Kongens Lyngby, Dania

w latach 2011-2015 – asystent - Uniwersytet Jagielloński, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

4. **Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).**

Osiągnięciem jest cykl 12 powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt. „Charakteryzacja i zastosowania centrów barwnych typu azot-wakancja w diamencie do pomiarów i obrazowania pól magnetycznych.

Cykl powiązanych artykułów, oznaczonych symbolami A1 do A10 powstał w całości w okresie po ukończeniu doktoratu. Poniżej przedstawiam publikacje cyklu z omówieniem motywacji podjętych badań, głównych wyników, konkluzji i wpływu danej pracy, a także mojego wkładu w powstanie publikacji.

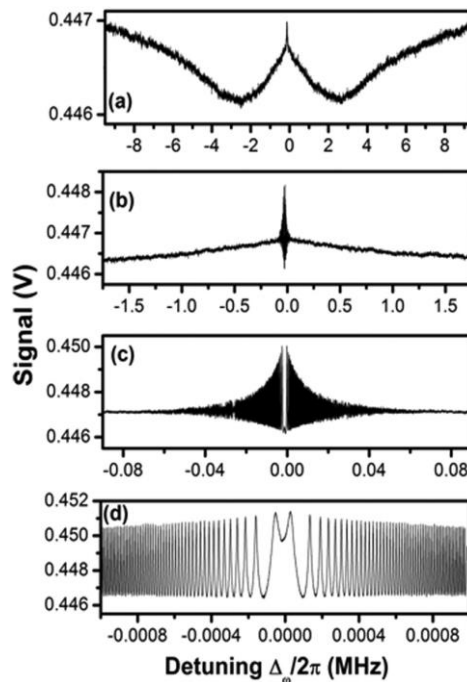
[A1] Mariusz Mrózek, Adam M. Wojciechowski, Daniel S. Rudnicki, Jerzy Zachorowski, Pauli Kehayias, Dmitry Budker, and Wojciech Gawlik, *Coherent population oscillations with nitrogen-vacancy color centers in diamond*, Physical Review B **94**, 035204 (2016)

Cykl rozpoczyna praca [A1], która była dla mnie pierwszą pracą związaną z fizyką centrów barwnych typu azot-wakancja (NV) w diamencie [1-2], choć tematyka ta była już wcześniej podejmowana w grupie prof. Wojciecha Gawlika w Zakładzie Fotoniki UJ, do której należałem. W poprzedzającej te badania pracy [3] próbki diamentowe z wysoką gęstością centrów NV poddawane były jednoczesnemu oddziaływaniu z dwoma polami mikrofalowymi. Stanowiło to pewne przeniesienie metodologii laserowej spektroskopii bezdopplerowskiej, stosowanej w fizyce atomowej do próbkowania wąskich przejść rezonansowych na tle szerokich poszerzonych dopplerowsko linii absorpcyjnych, na grunt rezonansu magnetycznego dla spinu ujemnie naładowanego centrum NV w stanie podstawowym. Rolę poszerzenia dopplerowskiego odgrywa tutaj poszerzenie niejednorodne związane z obecnością różnych defektów i domieszek paramagnetycznych w diamencie, w tym azotu i centrów NV.

W pracy [3] zaobserwowano właśnie efekt wypalania wąskiej dziury w poszerzonych rezonansach optycznie rejestrowanego rezonansu magnetycznego (ODMR) obserwowanych podczas przestrajania jednego z pól mikrofalowych, której istnienie wynikało z oddziaływania populacji z drugim polem o ustalonej częstotliwości. Kolejne, bardziej dokładne badania tego efektu prowadzone na UJ, w których brałem udział, unaocznily istotnie różny charakter dziur w wypalonym widmie, gdy oba pola są dostrojone do tego samego bądź odrębnych przejść pomiędzy stanami $m_s=0$ oraz $m_s=\pm 1$. O ile dla odrębnych przejść widoczna jest dziura spektralna o kształcie pojedynczego lorencjanu, o tyle przy obu polach oddziałujących na tym samym przejściu dokonaliśmy obserwacji zjawiska oscylacji populacji, w literaturze określanego z angielskiego jako *coherent population oscillations* (CPO). Nazwa tego zjawiska, choć przyjęta w literaturze, jest nieco myląca, gdyż sugeruje koherentne oddziaływanie z polami mikrofalowymi (np. jak dla oscylacji Rabiego) a w rzeczywistości oscylacje obserwowane są na skalach czasowych znacznie

dłuższych (wolniejszych) niż zanik koherencji kwantowej spinu. Niemniej jednak nasza obserwacja zjawiska CPO była pierwszą tego rodzaju w układzie ciała stałego i pokazała uniwersalność zaobserwowanego zjawiska. Ponadto, dokonaliśmy obserwacji wąskich struktur spektralnych o szerokości mniejszej niż szerokość naturalna, a zatem związanych z powolnymi procesami relaksacji. Przedstawiona w pracy [A1] interpretacja teoretyczna zjawiska, bazująca na formalizmie Baklanowa i Czebotajewa [4,5], powiązała te struktury z czasami relaksacji populacji (relaksacji podłużnej), co w konsekwencji oznacza, że obserwacja widma rezonansu ODMR pozwala na wyciągnięcie informacji o czasach relaksacji badanego układu.

Moim wkładem w tę pracę, oprócz przeprowadzenia części doświadczeń, było także wprowadzenie fenomenologicznego modelu widma uzyskiwanego podczas przemiatania częstotliwości jednego z pól mikrofalowych względem stałej częstotliwości drugiego. Model ten pozwolił odtworzyć sygnały obserwowane w doświadczeniu, które wynikają nie tylko z zależności stricte spektralnej, ale także z ciągłego (zachowującego fazę) sposobu przemiatania częstotliwości pola mikrofalowego. Ponadto, zaproponowałem wprowadzenie uśredniania po różnych fazach, co pozwoliło na uzyskanie uśrednionego widma pozbawionego oscylacji czasowych i mającego już prawdziwie spektralny charakter.



Rys. 1. Widmo ODMR z widoczną wypaloną dziurą w przedziale od -2 do +2 MHz. Podczas przemiatania częstotliwości jednego z pól mikrofalowych wokół częstości drugiego widoczny jest efekt koherentnych oscylacji populacji [A1].

[A2] Haitham A. R. El-Ella, Sepehr Ahmadi, Adam M. Wojciechowski, Alexander Huck, and Ulrik L. Andersen, *Optimised frequency modulation for continuous-wave optical magnetic resonance sensing using nitrogen-vacancy ensembles*, Optics Express **25**, 14809 (2017)

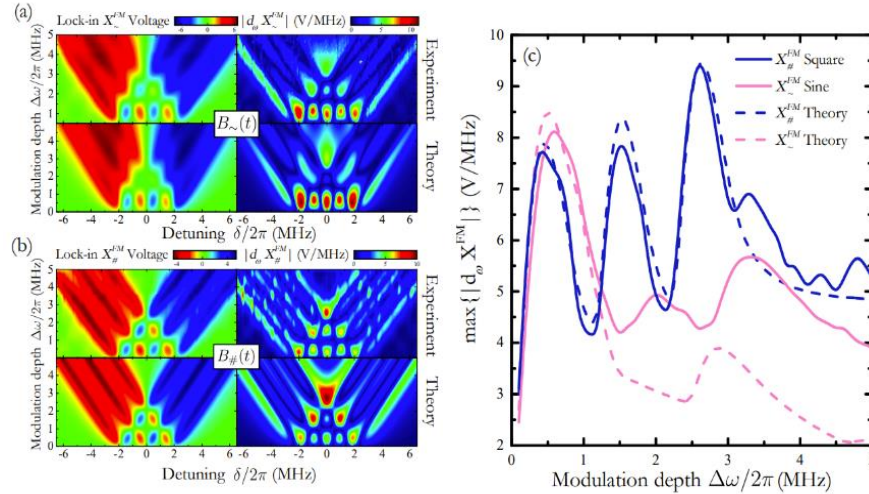
Praca ta powstała podczas odbywania stażu podoktorskiego w Duńskim Uniwersytecie Technicznym (DTU) i porusza temat modelowania sygnałów rezonansu magnetycznego ODMR [6] z modulacją częstotliwościową pola mikrofalowego i detekcją z użyciem wzmacniacza fazoczułego (*lock-in amplifier*). Motywacją do podjęcia tych badań, był fakt, że detekcja fazoczuła pozwala na ogromny wzrost precyzji rejestrowania linii rezonansowych i jest przez to bardzo często wykorzystywana w praktycznej magnetometrii.

Przy obserwacji rezonansów ODMR możliwe jest zastosowanie modulacji amplitudowej natężenia światła, np. poprzez zastosowanie modulatora akustooptycznego. Można w ten sposób zredukować wpływ szumów elektronicznych w detektorze fluorescencji, które typowo wykazują zależność typu $1/f$ i utrudniają uzyskanie dobrego stosunku sygnału do szumu w zakresie niskich częstotliwości. Zastosowanie modulacji z detekcją fazoczułą pozwala na zawężenie pasma detekcji sygnału z detektora światła i jednocześnie jego przesunięcie do częstości zastosowanej modulacji, gdzie poziom szumów jest typowo znacznie mniejszy. Modulacja amplitudowa pola mikrofalowego (MW) zamiast natężenia światła w technice ODMR, pozwala pójść o krok dalej, gdyż eliminuje dodatkowo wpływ wolnozmiennnej modulacji czy szumów samego lasera używanego do wzbudzenia centrów NV. W tej metodzie po demodulacji sygnału obserwuje się wyraźne rezonanse na zerowym tle, dla których niewielkie zmiany natężenia fluorescencji nie stanowią już istotnego przyczynku i tylko nieznacznie modyfikują amplitudę obserwowanego rezonansu.

Kolejnym rozwinięciem technik modulacyjnych jest zastosowanie modulacji częstotliwościowej pola mikrofalowego, która było przedmiotem analizy w pracy [A2]. W tej technice obserwowane są rezonanse o kształcie dyspersyjnym, także na zerowym tle. Taki kształt rezonansu pozwala na niemal natychmiastowe zbudowanie magnetometru poprzez dostrojenie częstotliwości pola mikrofalowego do rezonansu w pewnym ustalonym polu magnetycznym. Wtedy obecność dodatkowego pola magnetycznego przesuwają nieco centrum rezonansu, a obserwowany na wyjściu wzmacniacza fazoczułego sygnał jest w pewnym zakresie proporcjonalny do tego pola. Z punktu widzenia praktycznej magnetometrii istotne jest osiągnięcie maksymalnej pochodnej takiego sygnału po (przesunięciu) częstotliwości, co maksymalizuje czułość na pole magnetyczne. W pracy [A2] sygnały ODMR z modulowanym częstotliwościowo polem mikrofalowym były modelowane teoretycznie bazując na rozwiązaniach stacjonarnych równania master. Wyniki symulacji były także porównywane z sygnałami zmierzonymi doświadczalnie i pokazały doskonałą zgodność symulacji z doświadczeniami (Rys. 2). Ponadto modelowanie numeryczne pozwoliło także na wyznaczenie optymalnej głębokości modulacji częstotliwościowej w zależności od struktury nadsubtelnej centrów NV (potrójna struktura rezonansowa dla ^{14}N oraz podwójna dla ^{15}N) i szerokości obserwowanych rezonansów. W pracy tej udało się także zademonstrować wpływ natężenia światła (raty wzbudzenia) oraz częstości Rabiego pola mikrofalowego na amplitudę obserwowanych sygnałów (Fig.6a). Zaprezentowane wyniki są niezwykle istotne, gdyż znajdują wprost przełożenie na najczulsze magnetometry diamentowe. W ostatnich latach następuje bowiem gwałtowny rozwój technik przygotowania i polepszenie jakości próbek diamentów z centrami NV - struktura nadsubtelna centrów jest obserwowalna (przynajmniej częściowo

rozdzielona) w co raz gęstszych próbkach, z koncentracjami na poziomie $[NV]/[C] \sim 1$ ppm a nawet więcej.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na pomocy przeprowadzeniu doświadczeń i w modelowaniu teoretycznym sygnałów lock-in, w szczególności wyznaczeniu amplitudy sygnału i szumu z obliczonego rozkładu populacji. Moją ideą była także analiza optymalnej głębokości modulacji dla przypadku częściowo rozdzielonej struktury nadsubtelnej, której wyniki przedstawione zostały w rozdziale 3.2.



Rys. 2. Amplituda sygnału rezonansu ODMR dla pola mikrofalowego modulowanego częstotliwościowo w funkcji głębokości modulacji: a) wyniki symulacja, b) wyniki pomiarów, c) wartość maksymalna pochodnej po częstotliwości, która determinuje czułość na pole magnetyczne. Rysunek pochodzi z pracy [A2].

[A3] Adam M. Wojciechowski, Mürsel Karadas, Alexander Huck, Christian Osterkamp, Steffen Jankuhn, Jan Meijer, Fedor Jelezko, and Ulrik L. Andersen, *Contributed Review: Camera-limits for wide-field magnetic resonance imaging with a nitrogen vacancy spin sensor*, Review of Scientific Instruments **89**, 031501 (2018)

Praca ta jest pierwszą zrealizowaną w głównej mierze przeze mnie samego w ramach mojego stażu podoktorskiego w DTU, gdzie uczestniczyłem w projekcie „EXMAD – Extreme Sensitive Magnetometry using Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond”. Istotą powierzonego mi w projekcie zadania było opracowanie układu do prowadzenia pomiarów pól magnetycznych pochodzących od układów biologicznych, a zatem niezwykle słabych (rzędu pojedynczych nanotesla i słabszych). Zadanie to obejmowało zarówno zaprojektowanie i skonstruowanie układu optyczno-mikrofalowego o wysokiej czułości i przestrzennej zdolności rozdzielczej, jak również przygotowanie samych sensorów diamentowych, a później także prowadzenie doświadczeń z układami biologicznymi.

Jednym z poruszonych w tej pracy zagadnień jest analiza teoretycznej czułości układów do magnetometrii w tzw. szerokim polu, tzn. wykorzystujących sensor w postaci kamery, która rejestruje natężenie fluorescencji jako obraz. W takim układzie każdy piksel sensora

odpowiada za odrębny obszar na powierzchni diamentu, z którego następuje integracja fotonów. Czułość δB magnetometrów opartych na centrach azot-wakancja można określić posługując się ograniczeniem wynikającym z szumu śrutowego rejestrowanych fotonów [6] jako:

$$\delta B = \frac{h}{g\mu_B} \frac{\Gamma}{C\sqrt{\eta\mathcal{R}\tau}},$$

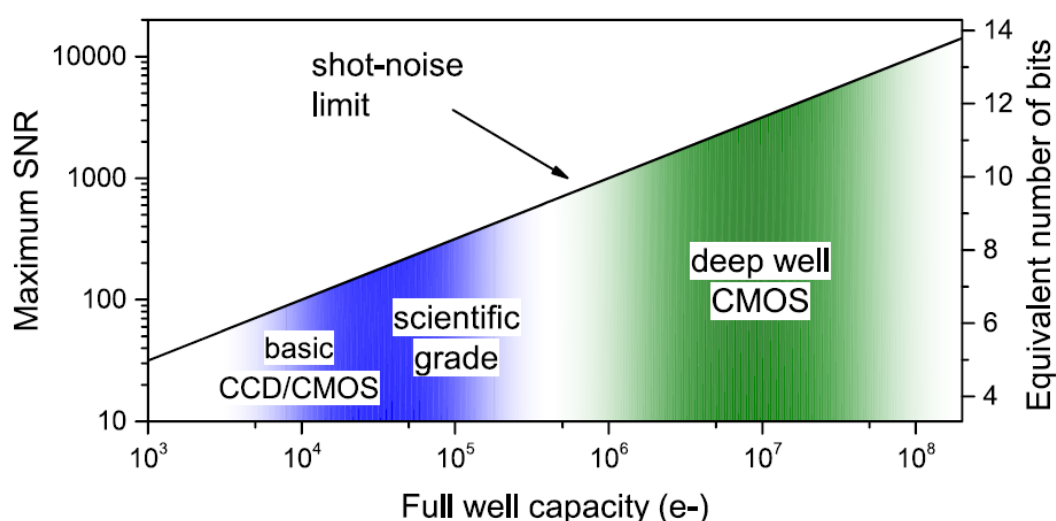
gdzie h - to stała Plancka, g - czynnik Landego, μ_B to magneton Bohra, Γ oznacza szerokość spektralną rezonansu, C oznacza kontrast fluorescencji wykorzystywanego rezonansu, η to wydajność zbierania światła fluorescencji przez układ optyczny, $\mathcal{R}$ oznacza ratę (częstotliwość) emisji fotonów przez układ, zaś τ oznacza czas pomiaru. Formuła ta pomija czynnik numeryczny wynikający z konkretnego kształtu linii rezonansowej (profil Lorentza, Gaussa, czy Voigta) gdyż jest on zazwyczaj bliski jedności. Dla wysokiej jakości próbek diamentowych, obserwowana w rezonansach ODMR szerokość linii rezonansowej Γ jest rzędu 0,5-1 MHz, zaś pierwszy ułamek w powyższym równaniu narzuca skalowanie w postaci $(28 \text{ MHz/mT})^{-1}$. Aby zatem zmaksymalizować czułość w doświadczeniu należy zadbać o optymalne wzbudzenie polem mikrofalowym tak, by zapewnić maksymalny osiągalny kontrast C nie skutkujący jeszcze istotnym poszerzaniem linii, a także zmaksymalizować rejestrowaną liczbę fotonów (wyrażenie pod pierwiastkiem). O ile maksymalizacja kontrastu rezonansu ODMR dla danej próbki nie jest problematyczna (zazwyczaj udaje się wysycić rezonans), o tyle ilość zbieranych fotonów zależy od wielu czynników w doświadczeniu: mocy lasera, oświetlonego obszaru próbki, gęstości centrów barwnych, apertury numerycznej i strat układu optycznego, czy czułości i ewentualnego czasu martwego użytego detektora.

W artykule [A3] pokazałem, że w przypadku stosowania kamer CCD/CMOS maksymalna liczba zliczeń fotonów dla każdego z pikseli jest ograniczona od góry przez tzw. głębokość studni piksela. Gdy ta liczba zostaje przekroczona, ładunki elektryczne zaczynają się rozpylić po sąsiednich studniach rozmywając obraz. Powstaje zatem fundamentalne ograniczenie na możliwą do osiągnięcia czułość, którym jest ograniczona średnia liczba fotonów i związana z nią wariancja (równa średniej w rozkładzie Poissona). Osiągalnym maksymalny stosunek optycznego sygnału do szumu (SNR) zależy w takim wypadku od głębokości studni piksela, która to wynika z konstrukcji i technologii wykonania sensora. Jak pokazano na Rys. 3. Podstawowe kamery oferują niski SNR, często poniżej 100. Warto tu wspomnieć, że SNR jest definiowany jako stosunek wielkości sygnału do odchylenia standardowego σ , natomiast rozrzut punktów w typowym widmie składającym się z kilkuset punktów będzie odpowiadał przedziałowi o szerokości około 6σ , co w połączeniu z kilkuprocentowym kontrastem w technice ODMR praktycznie nie pozwala na obserwację widma bez uśredniania sygnałów. Nieco większe możliwości otwierają kamery klasy badawczej, w których piksele mają większy fizyczny rozmiar i mogą przyjmować więcej fotoelektronów. Zazwyczaj w takich kamerach również przetworniki są szybsze i możliwa jest akwizycja większej liczby obrazów na sekundę.

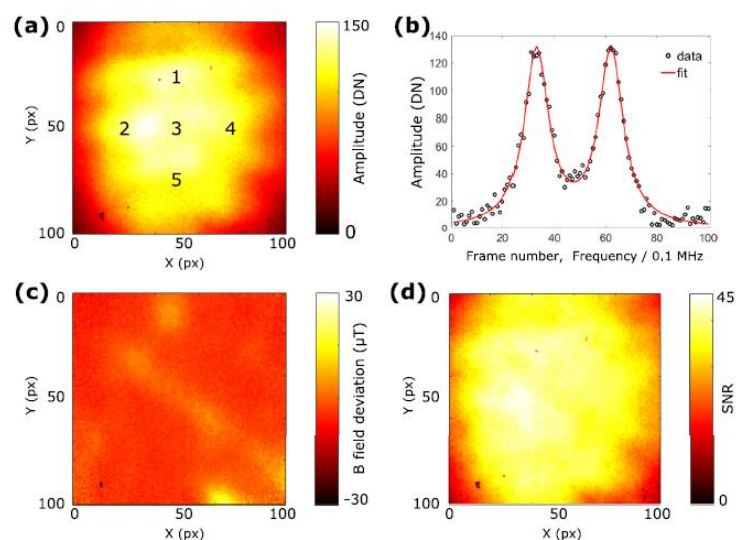
Dopiero wysoko specjalistyczne sensory o głębokich studniach piksela (deep well CMOS) lub kamery typu lock-in pozwalają na obserwację widm ODMR centrów NV w diamentach bez konieczności uśredniania kolejnych akwizycji. W pracy [A3] opisałem

sposób działania i po raz pierwszy zastosowałem do rejestracji widm rezonansu magnetycznego w centrach NV właśnie kamerę typu lock-in, tzn. umożliwiającą detekcję fázoczułą. Pozwoliło to na bezpośrednią obserwację widma ODMR i uzyskanie efektywnego SNR powyżej 40 (co odpowiada SNR na poziomie 800 dla zwykłych kamer), co przekładało się na czułość magnetyczną na poziomie $1\text{ }\mu\text{T}$ na piksel w pojedynczej ekspozycji lub też 142 nT dla akwizycji przez czas jednej sekundy.

Na zaprezentowane w tej pracy bardzo dobre wyniki złożyła się zarówno autorska koncepcja użycia kamery typu lock-in, jak również opracowanie przeze mnie układu optycznego do pobudzania i efektywnego zbierania fluorescencji centrów NV w szerokim polu [7]. Istotnym czynnikiem było także opracowanie diamentu z warstwą sensoryczną we współpracy z grupami z Ulm (wzrost warstwy domieszkowanej azotem) i Lipska (irradiacja, wiązką jonów helu, wygrzewanie) oraz lokalnie w Duńskim Uniwersytecie Technicznym (przygotowanie warstw: refleksyjnej i antyrefleksyjnej na diamencie, opracowanie anteny mikrofalowej o dużej jednorodności przestrzennej pola bliskiego i szerokim paśmie). Opracowany przeze mnie sensor diamentowy miał warstwę domieszkowaną azotem o grubości $1\text{ }\mu\text{m}$ i koncentracji centrów azot-wakancja na poziomie ułamka pojedynczego ppm. Jednocześnie szerokość linii rezonansowej wynosiła poniżej 0,6 MHz, co było możliwe do uzyskania m.in. dzięki izotopowej selekcji węgla ($[^{12}\text{C}] = 99,99\%$) w metanie użytym do syntezy warstwy sensorycznej oraz wytworzeniu wakancji przez jony helu o energii (1.8 MeV) zapewniającej wytworzenie wakancji w większej objętości niż sama warstwa azotowa. Taka konfiguracja zwiększa prawdopodobieństwo konwersji N do NV jednocześnie zmniejszając prawdopodobieństwo wytworzenia się klastrów wakancji w procesie wygrzewania i przez to pozytywnie wpływa na ilość defektów w kryształach oraz związanej z nimi dekoherencji.



Rys. 3. Zależność osiągalnego stosunku sygnału-do-szumy (SNR) oraz niezbędnej liczby bitów przetwornika analogowo-cyfrowego od głębokości studni piksela kamery. Linia ciągła jest wyznaczona przez optyczny szum śrutowy [A3].

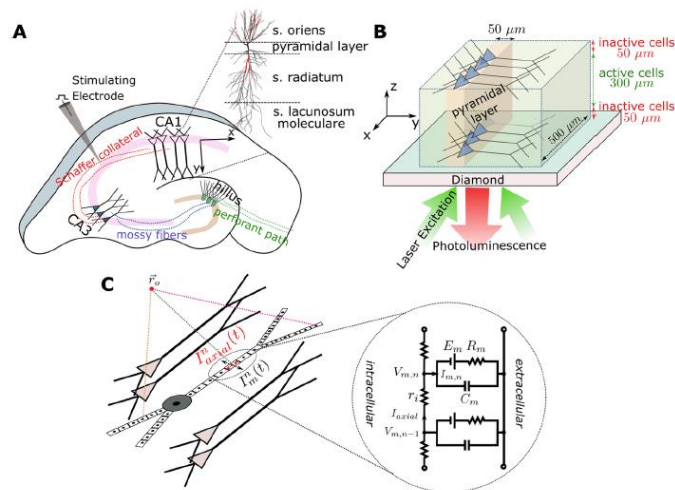


Rys. 4. Analiza obrazów wykonanych kamerą lock-in w funkcji częstotliwości mikrofal: (a) obraz natężenia fluorescencji; (b) widmo ODMR dla piksela z centralnego rejonu na obrazie (a); (c) odtworzona mapa jednorodnego pola magnetycznego; (d) mapa efektywnego stosunku sygnału do szumu (SNR). Aby znaleźć odpowiadającą wielkość SNR klasycznych kamer należy przemnożyć SNR kamery lock-in przez około 20 (czynnik rzędu $1/C$). Rysunek z pracy [A3].

Podsumowując mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeprowadzeniu analizy teoretycznej czułości magnetometrów wykorzystujących centra NV w diamencie i kamerę w roli detektora, opracowaniu sensora diamentowego o parametrach dostosowanych do obrazowania magnetycznego w szerokim polu, a także zaprojektowaniu i zbudowaniu układu optycznego oraz przeprowadzeniu pomiarów z kamerą typu lock-in, analizie zebranych danych (częściowo wraz z M. Karadasem) i przygotowaniu manuskryptu. Artykuł ten został doceniony przez redakcję Review of Scientific Instruments podniesieniem do statusu „contributed review”, a także umieszczeniem zdjęcia na okładce wydania.

[A4] Mürsel Karadas, Adam M. Wojciechowski, Alexander Huck, Nils O. Dalby, Ulrik L. Andersen, and Axel Thielscher, *Feasibility and resolution limits of opto-magnetic imaging of neural network activity in brain slices using color centers in diamond*, Scientific Reports **8**, 4503 (2018)

Niniejsza praca dotyczy problem obrazowania pól magnetycznych pochodzących od tkanki mózgowej przy użyciu sensora diamentowego, analogicznego do opisanego powyżej w punkcie [A3]. W pracy tej skupiliśmy się jednak na modelowaniu sygnałów magnetycznych pochodzenia biologicznego. W trakcie prowadzenia naszych badań nad tą tematyką grupa z Harvardu opublikowała w 2016 r. pierwsze wyniki pomiarów sygnałów pochodzących od potencjałów czynnościowych pojedynczego neuronu oraz wiązki neuronów zarejestrowanych dla wieloszczetu *Myxicola infundibulum* oraz kałamarnicy długopłetwej *Loligo pealeii* [8]. W odróżnieniu od tej pracy, naszym celem było modelowanie nie pojedynczej komórki, lecz tkanki w organizmie bardziej złożonym. Za cel została obrana struktura CA1 wewnątrz hipokampu gryzoni, gdyż jest to także modelowy układ w dziedzinie neurofizjologii (Rys. 5).



Rys. 5. Schemat układu biologicznego i układu do detekcji pola magnetycznego związanego z aktywnością komórek: (A) schemat hipokampu gryzonia z zaznaczeniem regionów CA1 i CA3, gdzie komórki piramidalne tworzą równoległe włókna, (B) model układ doświadczalny z tkanką umieszczoną na sensorze diamentowym, (C) modelowanie przepływu prądu przez neurony za pomocą obwodów zastępczych. Rysunek pochodzi z pracy [A4].

W hipokampie gryzoni można wyróżnić kilka obszarów, w których występują morfologicznie zbliżone neurony, których ułożenie jest regularne: komórki mają niemal równoległe ustawione aksony, zaś perikariony (somy, ciała komórkowe) leżą w jednej, wąskiej warstwie (por. region CA1 na Rys. 5A). Zakładając, że przez różne neurony będzie przepływał prąd w pewien skorelowany czasowo sposób, możemy oczekiwać, że przyczynki do pola magnetycznego pochodzące od prądu w różnych komórkach będą się do siebie dodawać zgodnie z zasadą superpozycji dla równoległych przewodników z prądem. W pracy [A4] w oparciu o trójwymiarowy model komórki z regionu CA1 i symulacje potencjałów czynnościowych dla pojedynczej komórki stworzony został komputerowy model tkanki CA1. Komórki w wielu kopiach zostały rozłożone tak by odtworzyć ich naturalną gęstość i uporządkowanie w tkance. Aby zbliżyć model do warunków doświadczeń neurofizjologicznych założono ponadto, że komórki znajdujące się w spodniej i wierzchniej warstwie obumarły na skutek przecięcia tkanki. Wynikowe pole magnetyczne było modelowane numerycznie przy założeniu pobudzania komórek z opóźnieniami zadanymi różnymi rozkładami (rozzrutem) w czasie. Modelowanie pokazało możliwość wygenerowania i rejestracji pól o indukcji przekraczającej 1 nT, a zatem porównywalnych z tymi zarejestrowanymi w pracy [8].

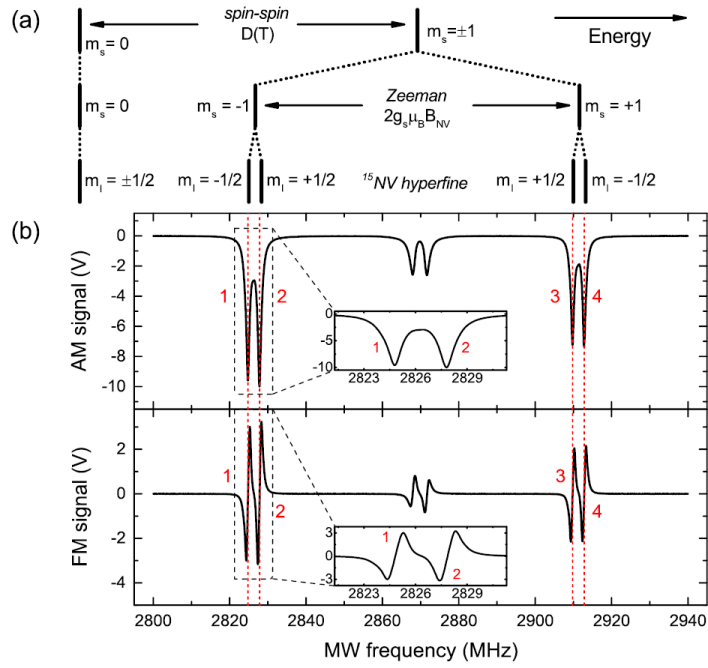
Drugim aspektem podjętym w pracy [A4] było zagadnienie odwikłania kierunku przepływu prądu w płaszczyźnie tkanki na podstawie dwuwymiarowego obrazu pola magnetycznego jaki może być otrzymany z sensora diamentowego, a także wyznaczenie przestrzennej zdolności rozdzielczej, którą można osiągnąć przy danej geometrii tkanki i sensora. Oszacowane zostały także wymagania dotyczące parametrów sensora, które pozwoliły by na zarejestrowanie potencjałów czynnościowych z wysoką przestrzenną zdolnością rozdzielczą ($< 10 \mu\text{m}$). Niestety sensor diamentowy i układ optyczny, którymi wtedy dysponowaliśmy miały łącznie czułość o 2 rzędy wielkości za małą by zarejestrować

tego typu sygnały bez uśredniania. Podjęte zostały natomiast próby rejestracji przez zespół magnetycznych sygnałów potencjałów czynnościowych w hipokampie szczura bez przestrzennej zdolności rozdzielczej (z fotodiodą zamiast kamery). Badania te nie zostały ujęte w pracy [A4], ale otworzyły drogę do powstania pracy [A7] opisaną w dalszej części.

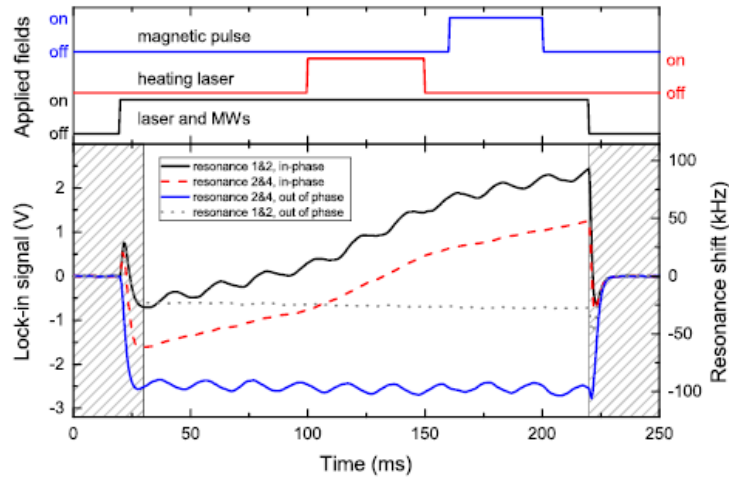
Modelowanie sygnałów magnetycznych pochodzących od potencjałów czynnościowych komórek w regionie CA1 zostało przeprowadzone przez doktoranta Mursela Karadasa, pod nadzorem jego promotora - prof. Axela Thielschera. Moim wkładem w powstanie tej pracy była pomoc w modelowaniu pola magnetycznego i metod jego detekcji z wykorzystaniem diamentu z warstwą sensoryczną centrów NV.

[A5] Adam M. Wojciechowski, Mürsel Karadas, Alexander Huck, Christian Osterkamp, Steffen Jankuhn, Jan Meijer, Fedor Jelezko, and Ulrik L. Andersen, *Precision temperature sensing in the presence of magnetic field noise and vice-versa using nitrogen-vacancy centers in diamond*, Applied Physics Letters **113**, 013502 (2018)

W tej pracy podjęty został przeze mnie temat wykrywania zmian pola magnetycznego oraz temperatury z wysoką czułością z wykorzystaniem sensora diamentowego z warstwą centrów NV. Opis przygotowania sensora został ujęty powyżej, w opisie publikacji [A3], w kontekście detekcji z użyciem kamery. W pracy [A5] sensorem była pojedyncza fotodioda, na której skupiane było światło fluorescencji z oświetlonej powierzchni warstwy sensorycznej. Dzięki rejestracji dużej liczby fotonów w jednostce czasu (dziesiątki mikrowatów mocy) poprzez pojedynczy detektor możliwe było uzyskanie wysokiego stosunku sygnału do szumu optycznego kosztem rozdzielczości przestrzennej. Dla zwiększenia czułości rejestracji sygnału optycznego wykorzystany został wzmacniacz fazoczuły (*lock-in amplifier*). Zarejestrowane widma doświadczalne rezonansów ODMR w polu magnetycznym około 2 mT odpowiadającym kierunkowi [110] w diamentcie są przedstawione na Rys. 6. Przy takiej orientacji pola magnetycznego dwie orientacje krystalograficzne centrów NV są ustawione prostopadłe do pola (przez co ich rezonanse nie ulegają rozszczepieniu), a dwie pozostałe cechuje identyczna wartość rzutu pola magnetycznego na oś centrum (degeneracja rezonansu). W tej konfiguracji dodatkowe słabe pole magnetyczne wzdłuż kierunku [110] powoduje przesunięcie położenia zdegenerowanego rezonansu o czynnik $\sqrt{2/3} \times 28 \text{ MHz/mT}$, natomiast niewielkie pola poprzeczne prowadzą w pierwszym przybliżeniu do jego nieistotnego poszerzenia. Monitorując zatem położenie rezonansu, czyli położenie minimum sygnału z modulacją AM lub przejścia przez zero sygnału FM na Rys. 6., można wyznaczyć zmianę energii danego stanu spinowego centrum NV. Ponieważ subtelne, milikelwinowe zmiany temperatury skutkują podobną zmianą energii stanów $m_s = \pm 1$ co nanoteslowe pola magnetyczne (75 Hz/K vs. 19.8 Hz/nT), przy precyzyjnych pomiarach zarówno pola magnetycznego jak i temperatury istotna jest jednoczesna znajomość częstotliwości obu rezonansów, tzn. przejść $m_s = 0 \leftrightarrow m_s = -1$ oraz $m_s = 0 \leftrightarrow m_s = +1$, do jednoznacznego wyznaczenia temperatury lub pola magnetycznego. W pracy [A5] zademonstrowany został protokół pozwalający na osiągnięcie tego celu w czasie niemal rzeczywistym (Rys. 7).



Rys. 6. (a) Schemat rozszczepienia poziomów energetycznych centrum NV z uwzględnieniem oddziaływania nadsubtelnego. (b) Widma ODMR zarejestrowane z modulacją amplitudową (górny panel) i częstotliwościową pola mikrofalowego. Precyzyjny pomiar położenia rezonansów pozwala na wyznaczenie parametru $D(T)$ i rzutu pola B [A5].



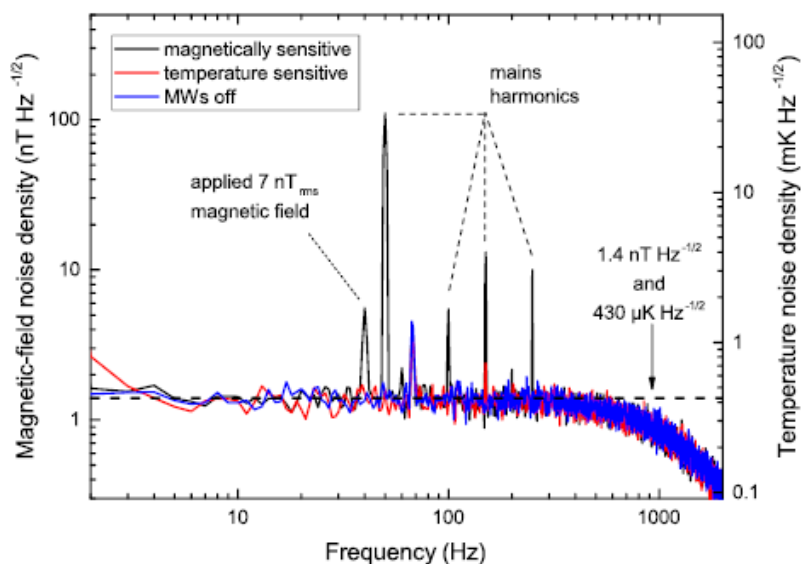
Rys. 7. Schemat sekwencji czasowej aplikowanych pól (górny panel) i zarejestrowane przebiegi w pojedynczej realizacji eksperymentu (dolny panel). Cztery konfiguracje pozwalają na: jednoczesną zmian temperatury i pola magnetycznego (czarna), zmiany samej temperatury (czerwona), wyłącznie zmian pola magnetycznego (niebieska) lub brak czułości na oba parametry (szara). Rysunek pochodzi z pracy [A5].

Na Rys. 7 przedstawione zostały sygnały zarejestrowane podczas impulsowej rejestracji sygnału ODMR z modulacją FM dwóch pól mikrofalowych, dostrojonych do środka rezonansów oznaczonych cyframi 1, 2 i 4 na Rys. 6. Oba pola były modulowane z tą samą częstotliwością i tą samą, bądź przeciwną fazą, jak to oznaczono w legendzie głównego panelu. Przebiegi czasowe ukazują pojedyncze realizacje eksperymentu, w którym włączany był dodatkowy laser podgrzewający oraz impuls pola magnetycznego o amplitudzie 100 nT. W zależności od konfiguracji adresowanych przejść i względnej fazy

modulacji pól mikrofalowych układ jest czuły na zmiany pola magnetycznego, temperatury, obu tych wielkości jednocześnie bądź żadnej z nich. Jak zostało pokazane w pracy, schodkowa zmiana pola magnetycznego nie jest widoczna w pojedynczym przebiegu ze względu na obecność znacznie silniejszego pola magnetycznego oscylującego na częstotliwości 50 Hz, pochodzącego od urządzeń laboratoryjnych, kabli i transformatorów. Z drugiej strony, łatwo obserwowalne jest podgrzewanie próbki, zarówno przez zielony laser i pole mikrofalowe, jak też szybsze podgrzewanie pod wpływem dodatkowego lasera.

W niniejszej pracy przeprowadzona została także ilościowa analiza czułości układu na zmiany pola magnetycznego. W tym celu zmierzone zostały charakterystyki spektralnej gęstości rejestrowanego szumu w konfiguracji czulej i nieczulej na pole magnetyczne. Poziom zarejestrowanego białego szumu odpowiada czułości $1,4 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$, co odpowiada także $430 \text{ } \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ czułości termometrycznej. Te wyniki potwierdzają bardzo wysoką jakość opracowanego układu i sensora, a jednocześnie wskazały drogę do dalszej optymalizacji sensora poprzez: zwiększenie grubości warstwy sensorycznej, gdy obrazowanie z wysoką przestrzenną zdolnością rozdzielczą nie jest konieczne; a także dalsze zwiększenie natężenia rejestrowanej fluorescencji poprzez boczne oświetlenie próbki zielonym laserem, co zostało wykorzystane w pracy [A7].

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji symultanicznego wykorzystanie dwóch modulowanych pól mikrofalowych, opracowaniu sensora diamentowego (we współpracy) i zbudowaniu układu optycznego oraz przeprowadzeniu pomiarów, opracowaniu wyników i przygotowaniu manuskryptu.



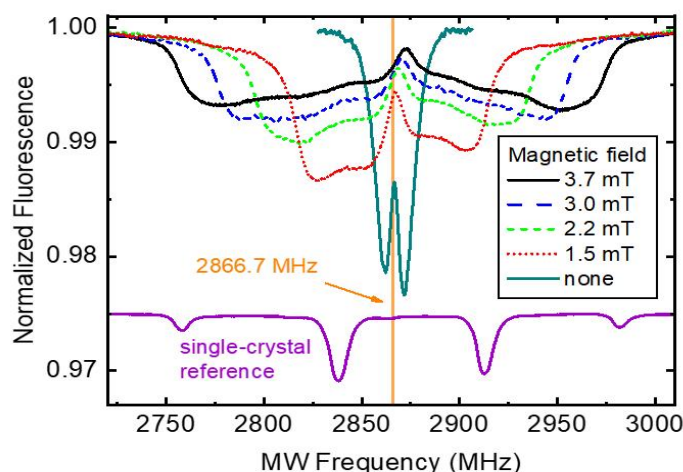
Rys. 8. Gęstość spektralna szumu wyrażona w jednostkach pola magnetycznego i temperatury. W konfiguracji czulej na zmiany pola magnetycznego widoczne są przyczynki od harmonicznym sieci zasilania i testowy sygnał dla 40 Hz. W konfiguracji nieczulej na pole przyczynki te są znikają. Bez pola mikrofalowego widoczny jest poziom szumu elektronicznego (optyczny szum śrutowy jest około 3 krotnie mniejszy). Rysunek pochodzi z pracy [A5].

[A6] Adam M. Wojciechowski, Paulina Nakonieczna, Mariusz Mrózek, Krystian Sycz, Andrzej Kruk, Mateusz Ficek, Maciej Głowacki, Robert Bogdanowicz, and Wojciech Gawlik, *Optical Magnetometry Based on Nanodiamonds with Nitrogen-Vacancy Color Centers*, *Materials* **12**, 2951 (2019)

Praca [A6] jest pierwszą z prac realizowanych przeze mnie po zakończeniu stażu w DTU i uzyskaniu zatrudnienia na UJ. W ramach projektu OPUS NCN wspólnego z Politechniką Gdańską prowadzone były na UJ badania widm proszków i zawiesin nanodiamantowych z wysoką koncentracją centrów NV. Widma ODMR takich próbek wykazują ciągły charakter (brak dyskretnych rezonansów) [9], gdyż każdy nanodiamant jest zorientowany przypadkowo względem pola magnetycznego (Rys. 9).

Tematem pracy [A6] jest praktyczne zastosowanie w pomiarach pól magnetycznych nanodiamentów w postaci wyschniętych zawiesin proszkowych naniesionych na podłoża szklane. Motywacją do podjęcia tej tematyki były konsultacje z prof. Ryszardem Buczyńskim i pozyskanie z jego grupy obrazowodu (wiązki składającej się z wielu światłowodów optycznych) optycznego o aperturze numerycznej $NA > 0.5$. Ta nadzwyczaj wysoka wartość apertury zapewnia efektywne zbieranie światła pochodzącego od fluorescencji, która typowo emitowana jest w pełny kąt bryłowy. Przyjmuje się, że natężenie sygnału fluorescencji skaluje się proporcjonalnie z kwadratem apertury numerycznej obiektywu mikroskopowego. W przypadku diamentów z centrami barwnymi NV, w szczególności płytek diamentowych, zależność ta bywa nieco inna z uwagi na straty frenalowskie na granicy diament-powietrze, lecz dalej preferowane są możliwie największe apertury, które pozwalają na rejestrację silniejszych sygnałów optycznych.

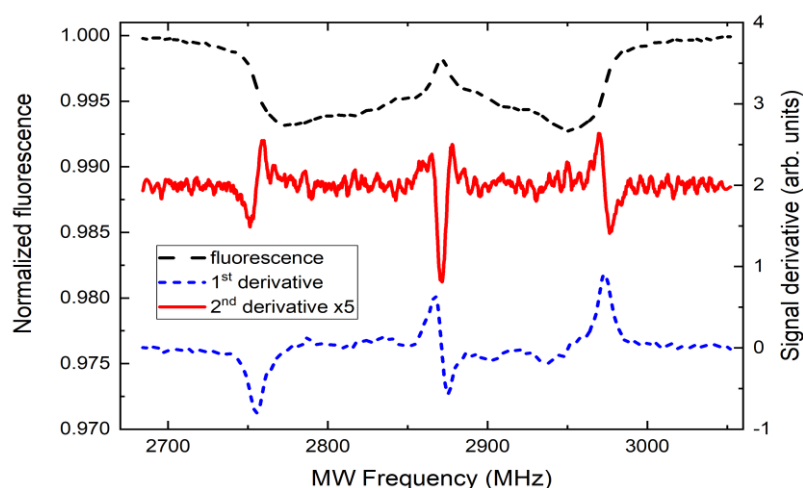
Głównym rezultatem pracy jest opracowanie metody pomiarów pola magnetycznego z wykorzystaniem ciągłego widma optycznie wykrywanego rezonansu magnetycznego w zbiorze nanodiamentów. O ile we wcześniejszej pracy [9] pokazano możliwość dostarczania światła do nanodiamentów przez światłowód, o tyle detekcja fluorescencji wymagała już użycia dodatkowego obiektywu mikroskopowego obserwującego z boku obszar przewężenia (*taper*) światłowodu. W pracy [A6] udało się natomiast zarejestrować



Rys. 9. Widma ODMR wyschniętej zawiesiny nanodiamentów (140 nm) w funkcji pola magnetycznego. Dla referencji pokazano kształt widma zarejestrowanego w monokryształach. Asymetria widm wynika z charakterystyki użytej anteny. Obraz z pracy [A6].

sygnały ODMR z dostarczaniem światła wzbudzającego i rejestracją fluorescencji poprzez odcinek obrazowodu. Zaproponowana została także metoda szybkiego pomiaru pola magnetycznego z wykorzystaniem pochodnych widma (Rys. 10), które można w względnie łatwy sposób rejestrować także sprzętowo, stosując modulację FM pola mikrofalowego i wykorzystując wzmacniacz fazoczuły do demodulacji. Jest to istotne z uwagi na relatywnie niską cenę i dużą dostępność nanodiamentów (względem płytek syntetycznego diamentu) i prostotę osadzania nanodiamentów na obrazowodzie, np. metodą zakroplenia zawiesiną i odparowania rozpuszczalnika.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji użycia obrazowodu z naniesionymi diamentami, przygotowaniu układu optycznego i elektronicznego do skanowania powierzchni światłowodu, przeprowadzeniu pomiarów fluorescencji i rezonansu ODMR z obrazowodem, opracowaniu wyników dotyczących zastosowania pochodnych do detekcji pola magnetycznego (bez zbierania widm wyschniętych zawiesin) oraz na przygotowaniu manuskryptu.



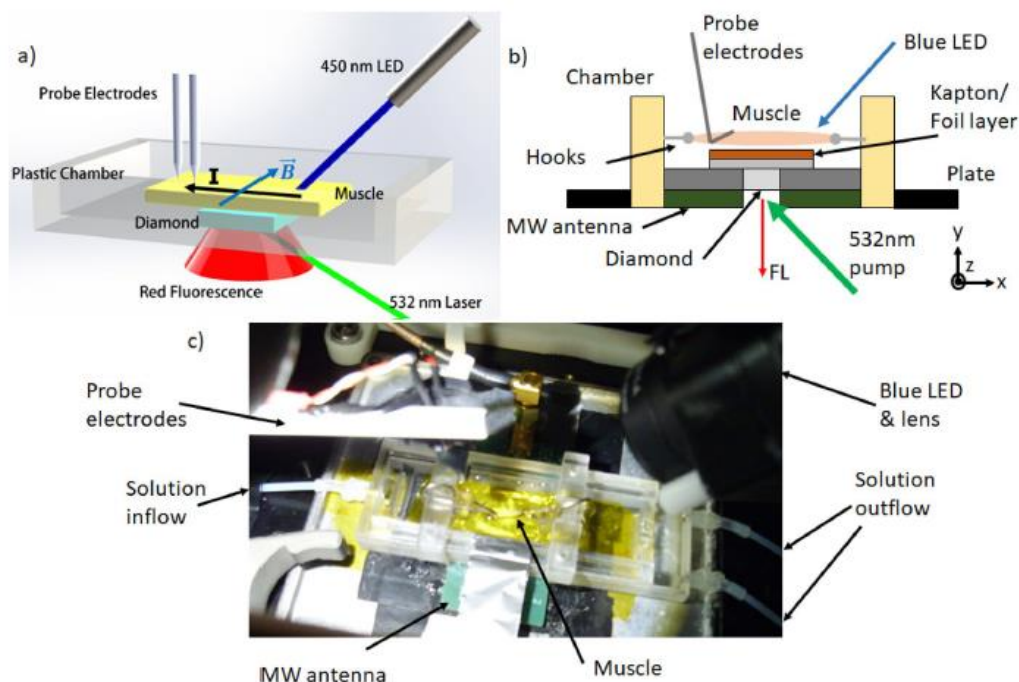
Rys. 10. Ilustracja metody pomiaru pola magnetycznego z wykorzystaniem ciągłego widma ODMR arbitralnie zorientowanych nanodiamentów. Ekstrema pierwszej pochodnej lub przejścia przez zero drugiej pochodnej sygnału fluorescencji mogą być użyte do wyznaczenia szerokości widma i tym samym, po kalibracji, wyznaczenia wartości pola magnetycznego. Obraz z pracy [A6]

[A7] James L. Webb, Luca Troise, Nikolaj W. Hansen, Christofer Olsson, Adam M. Wojciechowski, Jocelyn Achard, Ovidiu Brinza, Robert Staacke, Michael Kieschnick, Jan Meijer, Axel Thielscher, Jean-Francois Perrier, Kirstine Berg-Sørensen, Alexander Huck, and Ulrik L. Andersen, *Detection of biological signals from a live mammalian muscle using an early stage diamond quantum sensor*, Scientific Reports **11**, 2412 (2021)

Praca [A7] jest kontynuacją prac prowadzonych w DTU nad detekcją pól magnetycznych pochodzących od złożonych układów biologicznych (tkanki), opisanych przy okazji prac [A3], [A4] i [A5]. O ile sensor używany we wcześniejszych pracach oferował czułość na poziomie około $1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$, tak tutaj użyta została inna próbka

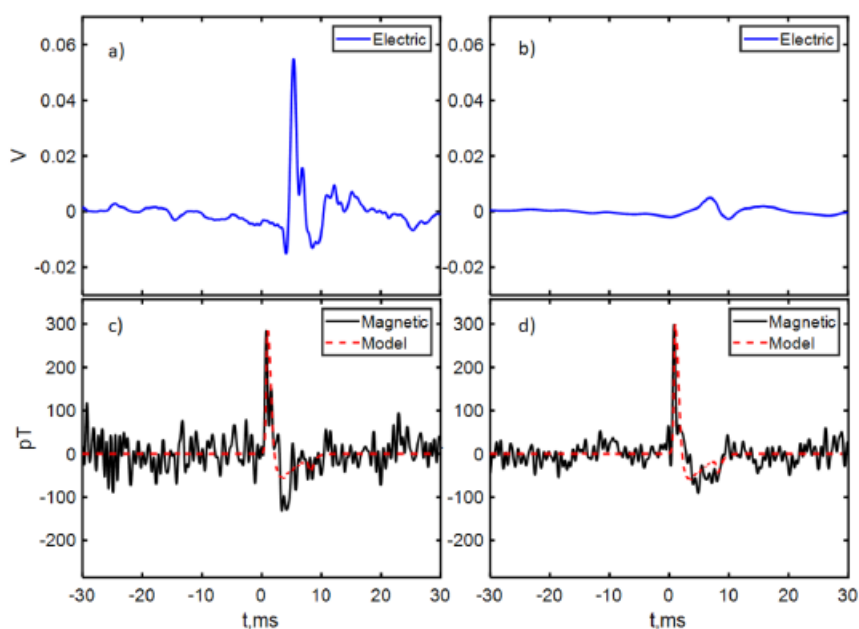
diamentowa z dwudziestokrotnie grubszą warstwą centrów NV, co pozwoliło na detekcję znacznie silniejszych sygnałów fluorescencji, kosztem pogorszenia przestrzennej zdolności rozdzielczej sensora (nie była ona istotna w przeprowadzonych pomiarach). Ponadto zastosowanie grubej warstwy centrów sprawiło, że zasadne było zmodyfikowanie układu oświetlającego warstwę z układu epifluorescencyjnego, na oświetlenie boczne. W ten sposób udało się rejestrować sygnały fluorescencji o mocy 6 mW przy 2 W mocy światła wzbudzającego i poprawić czułość do poziomu 50 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$.

Usprawnienia poczynione w DTU w układzie magnetometru do pomiarów biologicznych, który był pierwotnie przygotowany przeze mnie, a także w sposobie filtrowania i analizy danych pozwoliły w końcu na skuteczne zarejestrowanie bardzo słabych (~ 300 pT amplitudy) sygnałów magnetycznych związanych z propagacją potencjału czynnościowego w komórkach tkanki mięśniowej myszy (Rys. 12). Dzięki przeprowadzeniu doświadczeń z optogenetycznie modyfikowanymi myszami, u których błony komórkowe zawierają białko rodopsyny kanałowej (ChR2). Białko ChR2 w komórkach mięśnia pod wpływem światła o długości fali 470 nm otwiera kanał kationowy, co prowadzi do pobudzenia potencjału czynnościowego. Jego propagacja przez tkankę jest następnie rejestrowana przez magnetometr diamentowy (poniżej mięśnia, na jego środku) oraz elektrody (na końcu mięśnia). Widoczne jest zatem opóźnienie sygnału elektrycznego względem magnetycznego, które wynika z rozsunięcia obszarów obu detekcji i skończonej szybkości propagacji potencjału czynnościowego w komórkach tkanki mięśniowej.



Rys. 11. Układ do pomiarów sygnałów magnetycznych tkanki mięśniowej myszy: (a) schemat układu optyczno-elektronicznego; (b) schemat zamocowania próbki biologicznej w komorze fluidycznej; (c) zdjęcie układu doświadczalnego z zamocowanym mięśniem. Obraz z pracy [A7].

Wyniki przedstawione w pracy [A7] są niezwykle wartościowe, gdyż stanowiły pierwszą w świecie demonstrację rejestracji sygnałów biologicznych z tkanek ssaków przy użyciu sensora diamentowego z warstwą centrów NV. Stanowią one rezultat wielu lat pracy zespołu w DTU w ramach kilku projektów badawczych. Moim wkładem w powstanie tej pracy było opracowanie i konstrukcja układu optyczno-mikrofalowego do precyzyjnych pomiarów pól magnetycznych w próbkach biologicznych (elementy widoczne na Rys. 11), opracowanie i charakteryzacja szeregu sensorów diamentowych z warstwą centrów barwnych azot-wakancja przy powierzchni, przeprowadzenie wstępnych doświadczeń z próbkami biologicznymi i korekta manuskryptu.



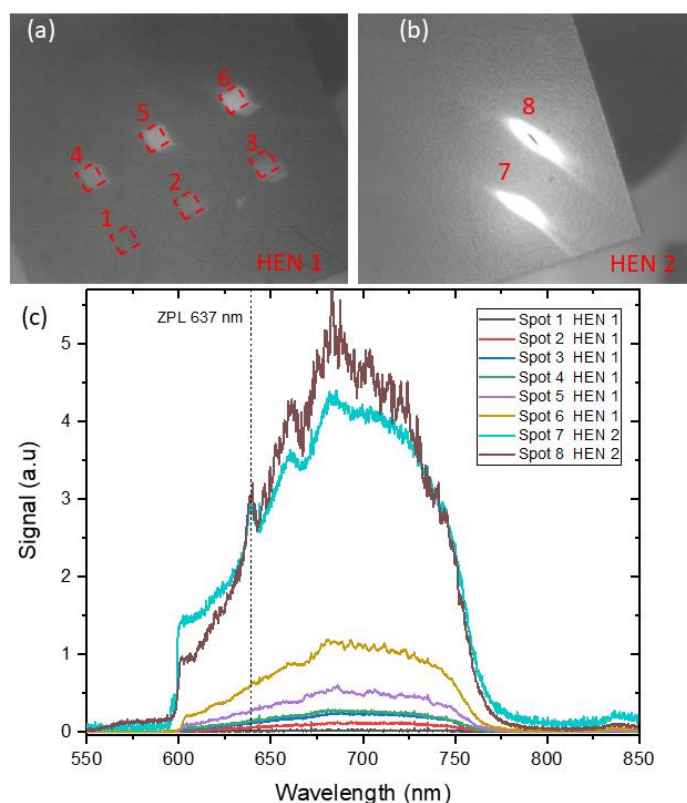
Rys. 12. Sygnały elektryczne (a, b) i magnetyczne (c, d) związane z propagacją potencjału czynnościowego przez dwie próbki mięśni myszy po pobudzeniu optycznym: (a, c) mięsień 1, sygnały uśredniane przez 8 godzin (30×425 stymulacji); (b, d) mięsień 2, sygnały uśredniane przez 16 godzin (30×837 stymulacji). Obraz z pracy [A7].

[A8] Mariusz Mrózek, Mateusz Schabikowski, Marzena Mitura-Nowak, Janusz Lekki, Marta Marszałek, Adam M. Wojciechowski, and Wojciech Gawlik, *Nitrogen-Vacancy Color Centers Created by Proton Implantation in a Diamond*, *Materials* **14**, 833 (2021)

Centra barwne azot-wakancja w diamentie mogą być efektywnie wytwarzane w dużych koncentracjach (~ 1 ppm i więcej) poprzez zapewnienie odpowiednio wysokiej koncentracji azotu w diamentie i następane wytworzenie wakancji w procesach oddziaływania wysokoenergetycznych cząstek (elektronów, protonów, innych jonów, czy fotonów), które mogą wybijać atomy węgla z ich pozycji w sieci krystalicznej. Następnie taka próbka poddawana jest wygrzewaniu w temperaturze pomiędzy 600°C a 1200°C w warunkach próżni, bądź w atmosferze gazu ochronnego, co powoduje migrację wakancji i tworzenie się centrów barwnych azot-wakancja. Właściwości tak powstałych centrów NV, w szczególności czasy relaksacji podłużnej (T_1) i poprzecznej (T_2 i T_2^*), silnie

zależą od metody i parametrów ich wytwarzania. Z drugiej zaś strony, długie czasy relaksacji przekładają się wprost na zwiększenie czułości w precyzyjnych pomiarach, więc metody wytwarzania centrów są stale doskonalone przez wiele grup na świecie. Praca [A8] skupia się na analizie oddziaływania wysokoenergetycznej (1,8 MeV) wiązki protonów z diamentem o relatywnie wysokiej zawartości azotu (~50-100 ppm). Diamenty takie są dość powszechnie wytwarzane w procesie oddziaływania wysokiej temperatury i ciśnienia (ang. *high-pressure, high-temperature*, HPHT) na materię zawierającą węgiel (np. grafit).

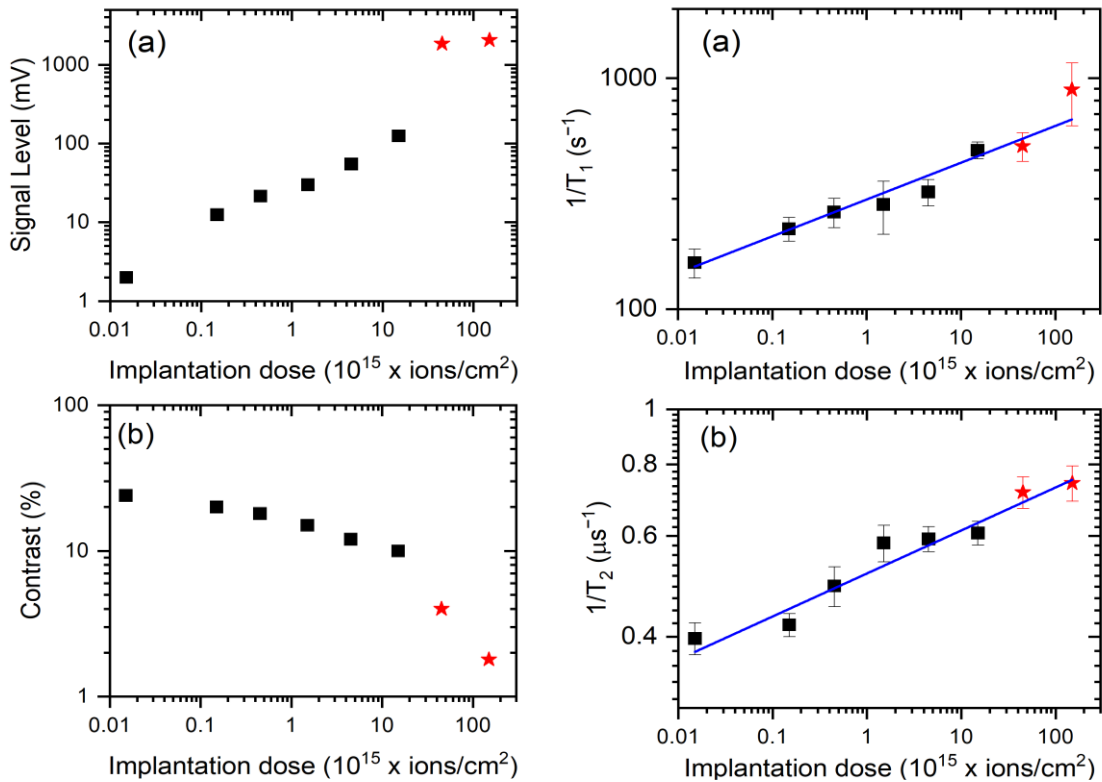
Motywacją do analizy implantacji protonami była z jednej strony chęć kontynuacji przeze mnie kierunku implantacji jonami o wysokich energiach i dalekim zasięgu w diamencie (dla protonów o energii 1,8 MeV jest to około 20 μm , najwięcej spośród jonów o danej energii), który podjąłem w trakcie stażu w DTU. W Krakowie zostałem liderem zespołu badawczego w projekcie TEAM-NET Fundacji na rzecz Nauki Polskiej i znacząco rozbudowałem laboratorium zajmujące się spektroskopią optyczno-mikrofalową centrów barwnych, gdzie możliwe stało się analizowanie czasów relaksacji T_2 z użyciem protokołów echa spinowego oraz dynamicznego odsprężania. Miałem tu także możliwość nawiązania współpracy z Instytutem Fizyki Jądrowej PAN, w którym znajdują się dwa implantery: do jonów o energii sięgającej 45 keV oraz akcelerator van de Graafa dla protonów i He^+ o energii sięgającej 2,5 MeV.



Rys. 13. (a, b) Obrazy fluorescencyjne dwóch diamentów HPHT poddanych implantacji protonami z dawką (fluencją) rosnącą wraz z numerem zaznaczonego pola w zakresie od $1,5 \times 10^{13}$ do $1,5 \times 10^{17} \text{ p}^+/\text{cm}^2$; (c) Widmo fluorescencji implantowanych obszarów z kształtem i linią zerofononową (ZPL, 637 nm) charakterystycznymi dla centrów NV [A8].

Głównym rezultatem pracy [A8] jest przeprowadzenie charakteryzacji sygnałów fluorescencji i kontrastu ODMR, a także raty relaksacji (szybkości, odwrotności czasu relaksacji) podłużnej i poprzecznej w funkcji dawki protonów (Rys. 14). Wyznaczony został także poziom dawki, przy którym próbka ulega degradacji. Jest to o tyle istotne, że protony oferują najdłuższy zasięg dla danej energii, a energie używane w tej pracy są już wysokie. Chcąc zatem wytwarzać wakancje w diamentach z warstwami sensorycznymi o grubości $\sim 10\text{-}20\text{ }\mu\text{m}$ korzysta się właśnie ze zbliżonych konfiguracji. Możliwe jest wprowadzić użycie wiązki elektronów o energii w zakresie MeV, lecz ich bardzo długa droga swobodna w diamencie sprawia, że wakancje kreowane są wtedy w pełnej objętości płytki diamentowej.

Moim wkładem w powstanie tej pracy były: idea wytworzenia warstwy centrów NV przy powierzchni w diamencie typu HPHT o wysokiej koncentracji azotu poprzez implantację wysokoenergetycznymi protonami, przygotowanie próbek (pozyskanie diamentów, implantacja protonów we współpracy z IFJ PAN, wygrzewanie w próżni, usuwanie warstw grafitowych kąpielami kwasowymi), kierowanie pracami badawczymi i przygotowanie manuskryptu (wspólnie z dr. Mariuszem Mrózkim).



Rys. 14. Zestawienie obserwowanych parametrów implantowanych obszarów w funkcji dawki: (a) poziom sygnału fluorescencji, (b) wartość kontrastu ODMR, (c) szybkość relaksacji podłużnej, (d) szybkość relaksacji poprzecznej T_2 . Na czarno i czerwono rozróżniono dane obu próbek diamentowych. Obrazy z pracy [A8].

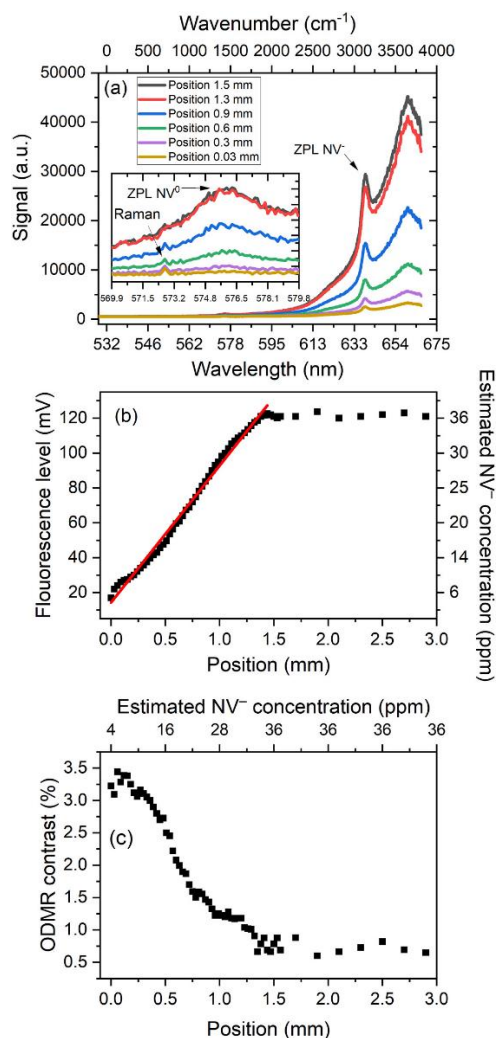
[A9] Mariusz Mrózek, Adam M. Wojciechowski, and Wojciech Gawlik, *Characterization of strong NV- gradient in the e-beam irradiated diamond sample*, *Diamond and Related Materials* **120**, 108689 (2021)

Praca ta jest w znacznej mierze komplementarna do pracy [A8] lecz tu badaniu poddana została próbka diamentowa naświetlana wiązką elektronową o wysokiej energii, przez co centra barwne azot-wakancja zostały wytworzone w jej pełnej grubości a nie w postaci warstwy przy powierzchni diamentu. Próbka ta została przygotowana jeszcze w 2012 r. w ramach współpracy prof. Wojciecha Gawlika z prof. Dmitrym Budkerem (Uniwersytet Kalifornijski w Berkeley oraz Uniwersytet Johana Gutenberga w Moguncji).

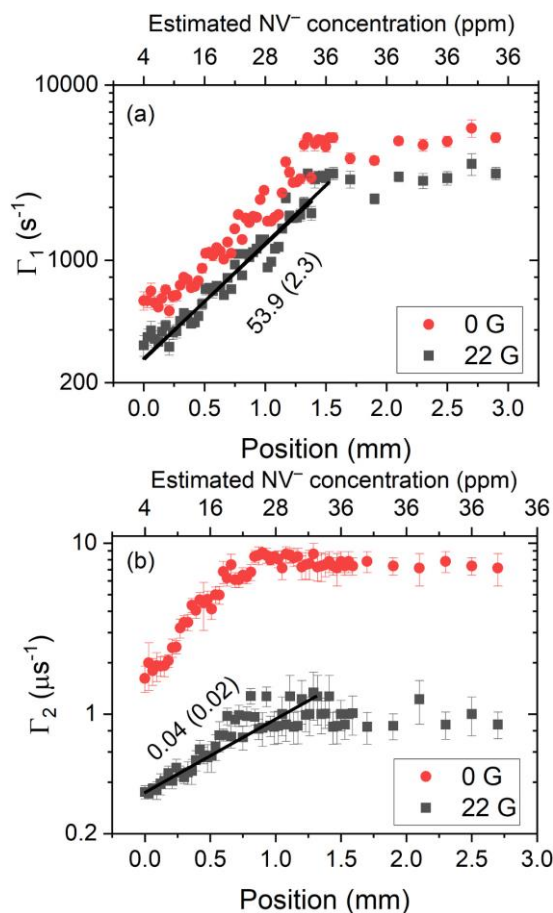
Rozwinięcie nowych technik pomiarowych w laboratorium na UJ pozwoliło natomiast na jej charakteryzację pod kątem czasów relaksacji. Zagadnienie to było o tyle ciekawe, że próbka ta wykazuje bardzo silną fluorescencję z dużym przestrzennym gradientem koncentracji centrów NV, związany z profilem przestrzennym użytej do naświetlania wiązki elektronów (Rys. 15). W miarę przemieszczania się od krawędzi próbki, gdzie nie nosi ona widocznych śladów iradiacji, w stronę naświetlonej części (jej kolor jest ciemno brązowy), widoczne jest stopniowe zwiększanie się poziomu fluorescencji aż do jego wysycenia. Z drugiej strony kontrast rezonansu ODMR jest w tej próbce niski (zwykle w zerowym polu magnetycznym obserwuje się kilkanaście procent kontrastu) i dodatkowo spada wraz z rosnącym poziomem fluorescencji. Można to wytłumaczyć coraz silniejszymi oddziaływaniami spinu centrów NV z innymi centrami i defektami wytworzonymi w procesie iradiacji (wakancje, ich klastry i inne uszkodzenia sieci krystalicznej). Tezę tę potwierdziły także obserwacje przestrzennej zmiany rat relaksacji, zarówno podłużnej jak i poprzecznej (Rys. 16). Dla obu z nich zachowanie jest podobne i wraz ze wzrostem dawki (i fluorescencji) rośnie szybkość relaksacji. Relaksacja podłużna ulega spowolnieniu o czynnik ~ 2 w niezerowym polu magnetycznym i dla najmniejszych dawek odpowiada milisekundowym czasom relaksacji. Z kolei relaksacja poprzeczna jest znacznie bardziej wrażliwa zarówno na dawkę iradiacji jak i obecność pola magnetycznego, co sugeruje dominujący wpływ oddziaływań dipol-dipol z domieszkami paramagnetycznymi.

Moim wkładem w powstanie tej pracy było kierowanie pracami badawczymi zespołu i rozwinięcie układu do pomiarów czasów relaksacji, udział w analizie i interpretacji zebranych danych doświadczalnych oraz korekta manuskryptu.

[A10] Paulina Czarnecka, Mona Jani, Saravanan Sengottuvel, Mariusz Mrózek, Paweł Dąbczyński, Adam Filipkowski, Ireneusz Kujawa, Dariusz Pysz, Wojciech Gawlik, and Adam M. Wojciechowski, *Magnetically-sensitive nanodiamond thin-films on glass fibers*, *Optics Materials Express* **12**, 444 (2022)



Rys. 16. Charakterystyka próbki B5: (a) widmo fluorescencji, (b) zależność poziomu fluorescencji, (c) zależność kontrastu ODMR w funkcji położenia na próbce [A9].



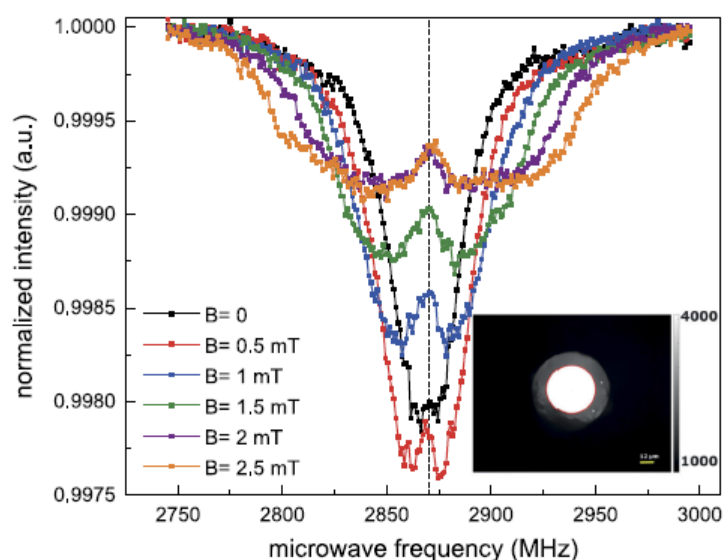
Rys. 15. Zależność rat relaksacji podłużnej (a) oraz poprzecznej (b) od położenia na próbce i estymowanej koncentracji centrów NV [A9].

Motywacją do powstania tej pracy była chęć rozwinięcia idei umieszczenia nanodiamentów na powierzchni światłowodu lub obrazowodu dla ich wykorzystania do zdalnej detekcji pól magnetycznych, zaprezentowanej już w pracy [A6]. O ile w pierwotnej pracy udało się wykazać techniczną możliwość detekcji sygnału fluorescencji i rezonansu ODMR poprzez odcinek światłowodu, było to możliwe tylko dla kilku miejsc na powierzchni czoła obrazowodu, w których osadziły się mikrodiamenty. Celem jaki przyświecał tej pracy było uzyskanie pełnego i możliwie równomiernego pokrycia czoła światłowodu nanodiamentami z zachowaniem możliwości detekcji sygnału fluorescencyjnego poprzez światłowód, co umożliwiłoby endoskopowe zastosowania takiego czujnika, np. sondowanie pól magnetycznych w trudnodostępnych lokalizacjach.

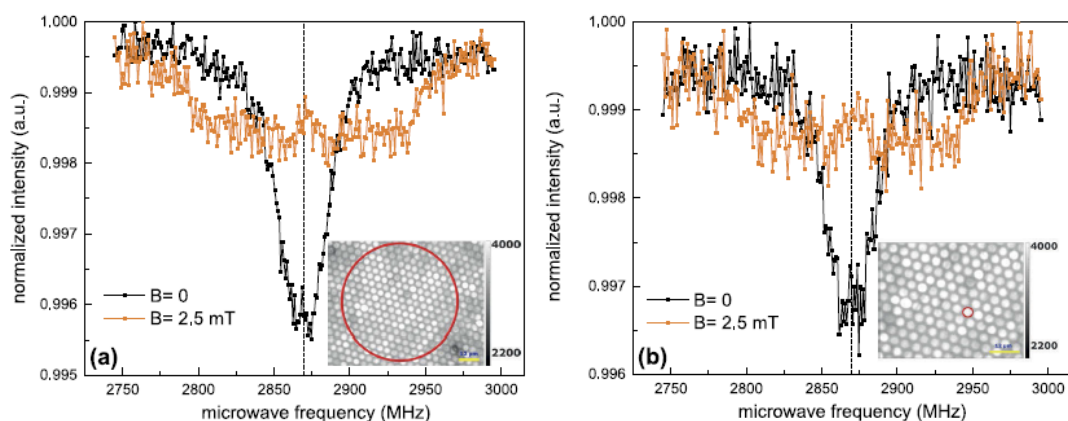
W pracy tej zastosowana została chemiczna technika kowalencyjnego wiązania nanodiamentów do powierzchni światłowodów szklanych, na którą składa się kilka etapów [10]. W pierwszej kolejności szklana powierzchnia włókna optycznego była poddawana

działaniu promieni UV i ozonu, co prowadzi do oksydacji powierzchni i wytworzenia grup hydroksylowych na powierzchni szkła. Kolejnym krokiem jest silanizacja, która była prowadzona z użyciem (3-Aminopropyl)trietoksyilanu (APTESu) rozpuszczonego w toluenie i skutkuje obecnością grup aminowych na powierzchni. Z drugiej strony nanodiamenty z centrami barwnymi NV i grupami karboksylowymi na powierzchni, zakupione w postaci komercyjnie dostępnej zawiesiny w wodzie, zostały poddane aktywacji z użyciem chlorowodoru 1-etylo-3-(3-dimetyloaminopropyl)karbodiimidu (EDC), co prowadzi do powstania amino-reaktywnej formy O-acylomocznika, która przyłącza się do grup aminowych na powierzchni szkła. Grupy estrowe, które nie uległy reakcji wiązania na powierzchni szkła były w kolejnym etapie zastępowane etylenodiaminą (EDA) i możliwe było dalsze powtórzenie procesu przyłączania diamentów (dla polepszenia stopnia pokrycia i/lub tworzenia kolejnej jego warstwy). Ponieważ acylomocznik ulega szybkiej degradacji, wymaga to jednak używania zawsze świeżo aktywowanych nanodiantów.

Zastosowanie wyżej opisanej techniki pozwoliło na wytworzenie cienkich filmów nanodiamentowych na powierzchni światłowodu wielomodowego o dużym rdzeniu, obrazowodu (wiązki światłowodowej), a także referencyjnych szkiełek nakrywkowych. Takie pokrycie może służyć do detekcji zmian pola magnetycznego poprzez obserwację zmian szerokości rezonansu w widmie ODMR (Rys. 17), jak to zostało opisane w pracy [A6]. W przypadku obrazowodu możliwe stało się uzyskanie sygnału nawet z pojedynczego piksela (włókna) w wiązce obrazowodowej (Rys. 18).



Rys. 17. Zależność widma ODMR od wartości przyłożonego pola magnetycznego zmierzona w światłowodzie wielomodowym z dużym rdzeniem. Wstawka pokazuje zdjęcie fluorescencyjne z widocznym jasnym rdzeniem i poświatą widoczną w płaszczu światłowodu. Sygnał optyczny był uśredniany w obszarze zaznaczonym czerwonym okręgiem [A10].



Rys. 18. Widma ODMR zarejestrowane z użyciem odcinka obrazowodu: (a) sygnał optyczny sumowany z wielu pikseli wiązki, (b) sygnał z pojedynczego włókna (piksela) wiązki. Czerwone okręgi we wstawkach wyznaczają obszary całkowania sygnałów [A10].

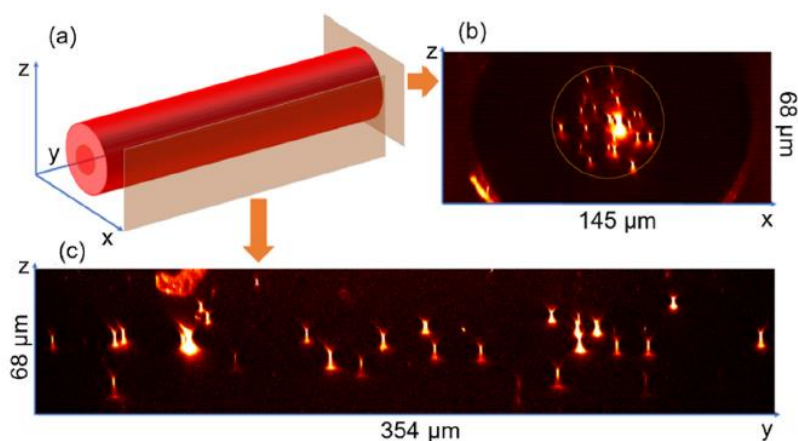
Moim wkładem w powstanie tej pracy było opracowanie koncepcji światłowodów z czołem pokrytym cienkim filmem nanodiamentowym, pozyskanie światłowodów i obrazowodów o wysokiej aperturze numerycznej w ramach współpracy z grupą prof. dr hab. Ryszarda Buczyńskiego (UW oraz IMIF), opracowanie pierwszych wersji układu i oprogramowania do rejestracji rezonansu ODMR w szerokim polu, kierowanie pracami zespołu realizującego badania opisane w artykule, analiza i weryfikacja prezentowanych danych oraz finalna redakcja manuskryptu.

[A11] Adam Filipkowski, Mariusz Mrózek, Grzegorz Stępniewski, Jakub Kierdaszuk, Aneta Drabińska, Tanvi Karpate, Maciej Głowacki, Mateusz Ficek, Wojciech Gawlik, Ryszard Buczyński, Adam Wojciechowski, Robert Bogdanowicz, and Mariusz Klimczak, *Volumetric incorporation of NV diamond emitters in nanostructured F2 glass magneto-optical fiber probes*, Carbon **196**, 10 (2022)

Ta praca była realizowaną w ramach projektu TEAM-NET FNP, zatytułowanego „Nanosensoryka i obrazowanie z wykorzystaniem efektów kwantowych: synergia szkła i diamentu dla zastosowań w biodiagnostyce nowej generacji” (akronim QUNNA od nazwy w języku angielskim), w ramach którego trzy grupy badawcze: z Uniwersytetu Warszawskiego (UW), Politechniki Gdańskiej (PG) oraz UJ podjęły się wytworzenia struktur światłowodowych z nanodiamentami rozłożonymi w objętości rdzenia włókna optycznego. Motywacją tych badań była chęć i możliwość połączenia wiedzy oraz doświadczenia zupełnie komplementarnych zespołów w konsorcjum: zespół dra hab. Mariusza Klimczaka na UW, wspierany przez prof. Ryszarda Buczyńskiego, specjalizuje się w projektowaniu i wytwarzaniu struktur fonicznych i światłowodowych, zespół prof. Roberta Bogdanowicza z PG posiada bogate doświadczenie w syntezowaniu i inżynierii materiałowej warstw diamentowych oraz nanodiamentów, zaś grupa kierowana przeze mnie na UJ przy wsparciu prof. Wojciecha Gawlika zajmuje się badaniem diamentów z centrami NV i ich zastosowaniami. Liczne wspólne dyskusje dotyczące technologii

szklanych i diamentowych, a także poczynione badania wstępne (np. praca [11]) zaowocowały opracowaniem koncepcji i technologii domieszkowania rdzenia światłowodu diamentami o wysokiej zawartości centrów NV.

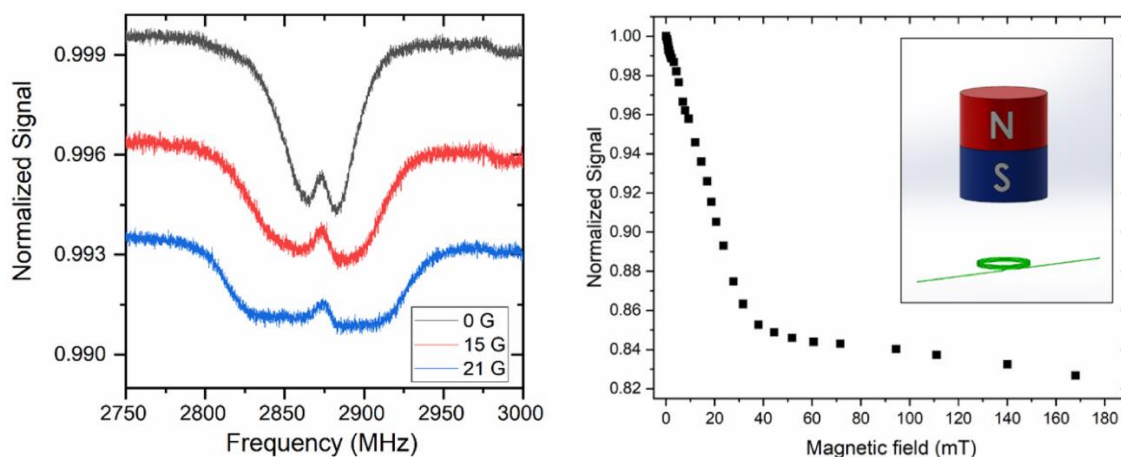
Typowe włókna optyczne wytwarzane są ze szkła kwarcowego (ang. fused silica). Czysty kwarc zapewnia bardzo dobre parametry optyczne, w szczególności niski poziom tłumienia, co jest fundamentalne dla zastosowań telekomunikacyjnych. Wadą takich szkieł jest natomiast wysoka temperatura wymagana do jego przetopienia, około 2000°C , znacznie przekraczająca temperatury, w których diament przekształca się w grafit pod ciśnieniem rzędu atmosferycznego. Z tego powodu integracja diamentów ze szklami kwarcowymi stanowi poważne wyzwanie technologiczne. Z pomocą przychodzą natomiast tzw. szkła miękkie, dla których temperatury mięknięcia oraz topnienia mogą schodzić poniżej 700°C . Pierwsze połączenie diamentów z włóknem optycznym zademonstrowano dla szkła tellurowego [12-14], które było topione i mieszane z proszkiem diamentowym w temperaturze 610°C , zaś późniejsze wyciąganie włókna następowało już w temperaturze obniżonej do 400°C . W pracach tych zaobserwowano jednak utratę części objętości nanodiamentów z uwagi na oddziaływanie wysokiej temperatury i obecność tlenu w szkłe oraz fakt, że diament zaczyna ulegać spalaniu w powietrzu w temperaturze $550\text{-}600^{\circ}\text{C}$. Mając na uwadze powyższe ograniczenia związane z oksydacją i grafityzacją diamentów, w pracy [A11] zastosowane zostało szkło ołowiowo-krzemianowe F2 (Schott), które wykazuje lepsze właściwości optyczne (transmisja) i mechaniczne od szkieł tellurowych przy temperaturze topnienia około 700°C . Dla zmniejszenia efektów oksydacyjnych, diamenty zostały wprowadzone do rdzenia w nowatorski sposób, polegający na wytworzeniu preformy rdzenia z 790 cienkich prętów szklanych, wyciągniętych z pojedynczego pierwotnego pręta szklanego pokrytego powierzchniowo nano/mikro-diamentami w procesie powlekania zanurzeniowego. Zawiesina zawierała proszek diamentów z centrami NV o rozmiarze około 1 mikrometra (maksimum rozkładu w pomiarze DLS wypada około 750 nm). Proces wyciągania preformy prowadzony był w atmosferze azotu, dzięki czemu możliwe było efektywne wprowadzenie nanodiamentów do objętości rdzenia światłowodu (Rys. 19).



Rys. 19. Fluorescencja mikrodiamentów w rdzeniu światłowodu: (a) ustawienie włókna na mikroskopie odwróconym; fluorescencja rzutowana na powierzchnię czołową (b) i boczną (c). Jasne punkty odpowiadają pojedynczym kryształom a ich asymetryczny kształt wynika z astygmatyzmu wywołanego obrazowaniem włókna z jego boku. Obraz z pracy [A11].

Wytworzony światłowód ma rdzeń o średnicy 50 μm a zatem jest wielomodowy. Diamenty są w nim rozmieszczone w postaci izolowanych kryształów, rozmieszczonych co około 10-20 μm wzdłuż włókna. Ponieważ cząstki diamentowe mają rozmiar porównywalny z długością fali światła, włókno to wykazuje istotne straty propagacyjne związane z rozpraszaniem Mie. Jego krótkie odcinki mogą jednak być użyte jako sensory do detekcji pola magnetycznego. Na Rys. 20 przedstawione zostały zależności sygnału ODMR i poziomu fluorescencji w funkcji pola magnetycznego zarejestrowane dla 60 cm odcinka światłowodu. Trudnością w detekcji sygnałów z odcinka włókna jest zapewnienie możliwie stałej wartości pola magnetycznego i oscylującego pola mikrofalowego (dla techniki ODMR) na jego długości. W pracy [A11] włókno było kształtowane w pętlę koncentryczną z magnesem wytwarzającym stałe pole, a także nawleczone na strukturę anteny mikrofalowej, co pozwoliło na wzbudzenie rezonansu ODMR w kilku paromilimetrowych odcinkach włókna. W odróżnieniu od prac prezentowanych przez grupy z Australii [14], światło wzbudzające i fluorescencja propagowały wzdłuż włókna. Wyniki pracy [A11] są zatem pierwszą demonstracją możliwości detekcji sygnałów istotnych dla praktycznej realizacji sensorów pola magnetycznego w oparciu o światłowody domieszkowane diamentami w pełnej objętości rdzenia.

Mój wkład w powstanie pracy [A11] polegał na kierowaniu pracami zespołu na UJ, który przeprowadził charakteryzację fluorescencyjną wytworzonego włókna i badania opto-magnetyczne, opracowaniu koncepcji pomiaru pola magnetycznego zwiniętym światłowodem technikami ODMR i bez pól mikrofalowych, analizie i interpretacji prezentowanych danych oraz korekcie manuskryptu.



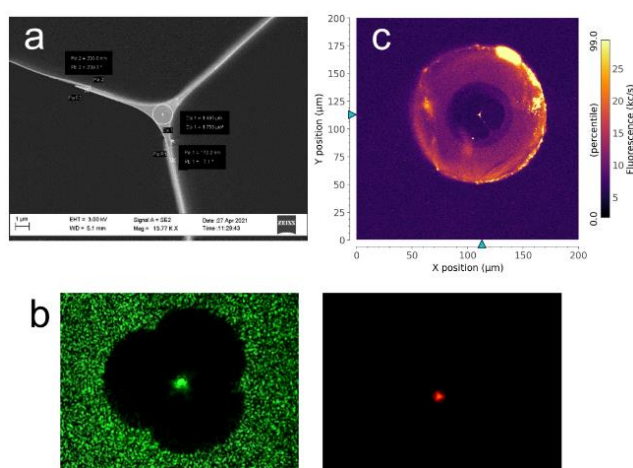
Rys. 20. (a) Zależność widma rezonansu ODMR od przyłożonego pola magnetycznego. Krzywe zostały rozsunięte dla przejrzystości. (b) Poziomy sygnał fluorescencji w funkcji pola magnetycznego. Obrazy z pracy [A11] .

[A12] Adam Filipkowski, Mariusz Mrózek, Grzegorz Stępniewski, Maciej Głowacki, Dariusz Pysz, Wojciech Gawlik, Ryszard Buczyński, Mariusz Klimczak, and Adam Wojciechowski, *Magnetically sensitive fiber probe with nitrogen-vacancy center nanodiamonds integrated in a suspended core*, Optics Express **30**, 19573 (2022)

Ostatnia praca cyklu dotyczy stanowi rozwinięcie idei światłowodu z rdzeniem domieszkowanym nanodiantamentami na włókna optyczne z zawieszonym rdzeniem (Rys. 21). Przygotowany światłowód posiada rdzeń o grubości około $1,5\ \mu\text{m}$, porównywalnej z rozmiarem mikrodiantmentów użytych do jego domieszkowania, stanowiącej także 2-3 krotność długości fali światła w nim propagującego. Rdzeń jest podtrzymywany przez bardzo cienkie mostki (tutaj o grubości około $150\text{--}280\ \text{nm}$). Mody takiego światłowodu są nieco szersze niż sam rdzeń, przez co możliwe jest oddziaływanie światła we włóknie z substancjami znajdującymi się wewnątrz komór powietrznych, przy powierzchni rdzenia. Tego typu włókna wykazują wysoki kontrast współczynników załamania światła pomiędzy szklanym rdzeniem a płaszczem, który stanowią komory włókna wypełnione powietrzem. Konsekwencją tego jest wysoka apertura numeryczna włókna oraz niski poziom strat zgięciowych.

Światłowód scharakteryzowany w pracy [A12] stanowi pierwszy prototyp włókna z zawieszonym rdzeniem, do którego domieszkowania wykorzystane zostały te same komercyjnie dostępne diamenty co w pracy [A11]. Mają one rozmiar niewiele mniejszy od średnicy rdzenia, przez co to włókno także wykazuje duże straty rozproszeniowe, wynoszące ponad $20\ \text{dB/m}$ w istotnym zakresie spektrum światła widzialnego $550\text{--}750\ \text{nm}$. Niemniej jednak udało się zaobserwować rezonanse ODMR stosując detekcję światła wychodzącego z czoła światłowodu, co stanowi znaczący krok milowy na drodze do wytworzenia włókna niskostratnego, który będzie domieszkowany nanodiantamentami o średnicy rzędu $100\ \text{nm}$, a zatem kilkukrotnie mniejszej od długości fali. Takie włókno zostało już wytworzone i jest przedmiotem kolejnych badań.

Moim wkładem w powstanie pracy [A12] było współautorstwo idei domieszkowania nanodiantamentami z centrami barwnymi NV światłowodów z zawieszonym rdzeniem, kierowanie pracami zespołu na UJ prowadzącego badania optyczne i opto-magnetyczne z przygotowanymi światłowodami, analiza i weryfikacja prezentowanych danych oraz korekta manuskryptu.



Rys. 21. Światłowód z zawieszonym rdzeniem domieszkowanym diamentami zawierającymi centra NV: (a) obraz SEM czoła włókna, (b) obrazy światła pobudzonego po przejściu przez włókno o długości $24\ \text{cm}$ (lewy panel) i fluorescencji centrów NV widocznej dopiero z użyciem filtra (prawy panel), (c) Fluorescencja z czoła światłowodu w obrazowaniu konfokalnym. Obraz z pracy [A12].

Literatura pomocnicza

- [1] F. Jelezko, I. Popa, A. Gruber, C. Tietz, J. Wrachtrup, A. Nizovtsev, S. Kilin, *Applied Physics Letters* 81, 2160 (2002)
- [2] M. W. Doherty, N. B. Manson, P. Delaney, F. Jelezko, J. Wrachtrup, L. C. L. Hollenberg, *Physics Reports* 528, 1 (2013)
- [3] P. Kehayias, M. Mrózek, V. M. Acosta, A. Jarmola, D. S. Rudnicki, R. Folman, W. Gawlik, D. Budker, *Physical Review B* 89, 245202 (2014)
- [4] E. V. Baklanov and V. P. Chebotayev, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 60, 552 (1971) [*Sov. Phys. JETP* 33, 300 (1971)]
- [5] E. V. Baklanov and V. P. Chebotayev, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 61, 922 (1971) [*Sov. Phys. JETP* 34, 490 (1972)]
- [6] L. Rondin, J.-P. Tetienne, T. Hingant, J.-F. Roch, P. Maletinsky, V. Jacques, *Reports on Progress in Physics* 77, 056503 (2014)
- [7] L. M. Pham, D. Le Sage, P. L. Stanwix, T. K. Yeung, D. Glenn, A. Trifonov, P. Cappellaro, P. R. Hemmer, M. D. Lukin, H. Park, A. Yacoby, and R. L. Walsworth, *New Journal of Physics* 13, 045021 (2011)
- [8] J. F. Barry, M. J. Turner, J. M. Schloss, D. R. Glenn, Y. Song, M. D. Lukin, H. Park, R. L. Walsworth, *Proceedings of National Academy of Sciences USA* 113, 14133 (2016)
- [9] I V Fedotov, L V Doronina-Amitonova, D A Sidorov-Biryukov, N A Safronov, A O Levchenko, S A Zibrov, S Blakley, H Perez, A V Akimov, A B Fedotov, P Hemmer, K Sakoda, V L Velichansky, M O Scully, A M Zheltikov, *Optics Letters* 39, 6755 (2014)
- [10] N. H. Patoary, A. Rai, K. P. Patel, A. Rebecca, W. Zhang, A. J. Ulrich, M. Galib, T. Desai, S. Zivanovic, M. Yousufuddin, A. L. Moore, A. D. Radadia, *Diamond and Related Materials* 101, 107605 (2020)
- [11] Z. Orzechowska, M. Mrózek, A. Filipkowski, D. Pysz, R. Stępień, M. Ficek, A. M. Wojciechowski, M. Klimczak, R. Bogdanowicz, W. Gawlik, *Advanced Quantum Technologies* 5, 2100128 (2022)
- [12] H. Ebendorff-Heidepriem, Y. Ruan, H. Ji, A.D. Greentree, B.C. Gibson, T.M. Monroe, *Opt. Mater. Express* 4, 2608 (2014)
- [13] Y. Ruan, H. Ji, B.C. Johnson, T. Ohshima, A.D. Greentree, B.C. Gibson, T.M. Monroe, H. Ebendorff-Heidepriem, *Opt. Mater. Express* 5, 73 (2015)
- [14] Y. Ruan, D.A. Simpson, J. Jeske, H. Ebendorff-Heidepriem, D.W.M. Lau, H. Ji, B. C. Johnson, T. Ohshima, S. Afshar V, L. Hollenberg, A.D. Greentree, T.M. Monroe, B. C. Gibson, *Scientific Reports* 8, 1268 (2018)

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

W styczniu 2006 roku, w ramach współpracy Zakładu Fotoniki z Uniwersytetem Kalifornijskim w Berkeley (USA), jako student studiów magisterskich wyjechałem do Berkeley na staż w grupie profesora Dmitry Budkera. W ramach tego jednomiesięcznego stażu badałem optycznie widma przejść w radiowych i mikrofalowych w strukturze nadsubtelnej atomów potasu dla różnych koncentracji (temperatur). Celem tych badań było zmierzenie szybkości procesów relaksacyjnych w komórce z pokryciem parafinowym i zweryfikowanie przydatności takich komórek do budowy atomowych, przenośnych wzorców częstości. Wyniki tych pomiarów zostały opublikowane w *Physical Review A*.

W ramach studiów doktoranckich, niezależnie od prowadzenia badań nad efektami nieliniowymi w zimnych atomach, zajmowałem się także podobnymi efektami w komórkach wypełnionych parami atomowymi w temperaturze zbliżonej do pokojowej. Znaczna część tych badań była związana z dwumiesięcznym pobytem w National Physical Laboratory (Wielka Brytania), w grupie dra Witolda Chałupczaka. W trakcie mojego pobytu w Teddington zajmowałem się wykorzystaniem magnetometrii optycznej dla celów wykrywania pól o częstościach radiowych. W szczególności moja interpretacja i symulacja obserwowanych w widmach zależności leżały u podstaw dwóch kolejnych publikacji naukowych w *Physical Review A*.

W połowie grudnia 2015 roku rozpocząłem staż podoktorski w grupie prof. Ulrika Lunda Andersena na Duńskim Uniwersytecie Technicznym w Lyngby koło Kopenhagi, kontynuując badania z wykorzystaniem centrów barwnych w diamentach. Projekt *Extreme sensitive magnetometry using nitrogen-vacancy centers in diamond (EXMAD)*, w którym uczestniczyłem, miał na celu badanie pól magnetycznych przy użyciu diamentów z centrami barwnymi typu: objętościowego (bulk), planarnego (z cienką warstwą centrów barwnych) oraz punktowego (z wykorzystaniem pojedynczych centrów). W ramach projektu zbudowałem mikroskop fluorescencyjny szerokiego pola do obrazowania pól magnetycznych z wykorzystaniem struktur planarnych. Wyniki osiągnięte z tym układem pozwoliły na zaprojektowanie i przygotowanie we współpracy z prof. Fedorem Jelezko (Uniwersytet w Ulm) oraz prof. Jocelyn Achardem (CNRS, Francja) izotopowo oczyszczonych ($[^{12}\text{C}]/[\text{C}] > 99.9\%$) próbek diamentowych z wysoką zawartością azotu w wierzchniej warstwie. We współpracy z prof. Janem Meijerem (Uniwersytet w Lipsku) dokonano implantacji jonów helu o energii 1,8 MeV i protonów o energii około 2 MeV, co zaowocowało uzyskaniem sensorów diamentowych z quasi-dwuwymiarową warstwą centrów NV o wysokiej gęstości (rzędu ppm) przy jednoczesnym zachowaniu wąskich linii rezonansu magnetycznego ($\sim 0,6$ MHz). Próbki te są obecnie wykorzystywane do obrazowania pól magnetycznych pochodzących od przepływu prądów w wytwarzanych litograficznie mikrostrukturach oraz rejestracji pól pochodzenia biologicznego, o indukcji rzędu ułamków nanotesli. Te ostatnie badania prowadzone są na fragmentach (plasterkach) tkanki mózgowej hipokampu szczura utrzymywanych *in vitro*, z aktywnością stymulowaną elektrycznie i farmakologicznie. Badania prowadzone w Kopenhadze zaowocowały szeregiem opublikowanych artykułów w renomowanych czasopismach: *Optics Express*, *Physical Review B*, *Scientific Reports* (2x), *Review of Scientific Instruments* oraz *Applied*

Physics Letters. Wyniki moich badań prowadzonych w Kopenhadze prezentowałem także na konferencjach Central European Workshop on Quantum Optics 2017 oraz 50. Jubileuszowej konferencji EGAS w Krakowie w 2018 r. Mój udział w projekcie EXMAD pozwolił na znaczne poszerzenie wiedzy nie tylko w dziedzinie spektroskopii centrów barwnych i optyki kwantowej, ale także neurofizjologii i biofizyki, technik mikro i nanofabrykacji, hodowania próbek metodami chemicznego osadzania z fazy gazowej, implantacji jonów, a także symulacji numerycznych i projektowania CAD.

W drugiej połowie 2020 r. otrzymałem grant w konkursie OPUS LAP Narodowego Centrum Nauki zatytułowany „Zaawansowana magnetometria optyczna wirów w nadprzewodnikach niekonwencjonalnych”. Jest on realizowany wspólnie z grupą prof. Denisa Arčona z Instytutu Jožefa Stefana w Lublanie. Pod koniec grudnia 2021 roku został mi także przyznany grant QuantERA pod nazwą „Mikrofluidyczny kwantowy sensor diamentowy” (Mf-QDS), który od 1.07.2022 jest realizowany w międzynarodowym konsorcjum, którego kierownikami grup są prof. Javier Prior (Uniwersytet w Murcji, Lider konsorcjum), prof. Fedor Jelezko (Uniwersytet w Ulm) oraz prof. Alex Retzker (Uniwersytet Hebrajski w Jerozolimie).

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Przeprowadzone przeze mnie zajęcia dydaktyczne w podziale na lata i ze wskazaniem liczby godzin:

2022/2023 – Podstawy fizyki: Elektryczność i magnetyzm MT 45 godzin ćwiczeń

2021/2022 – Podstawy fizyki: Elektryczność i magnetyzm MT 45 godzin ćwiczeń

- Zaawansowane materiały (studia II st. ZMIN) 12 + 6 godzin (wykład + ćwiczenia)

2020/2021 – Podstawy fizyki: Elektryczność i magnetyzm MT 45 godzin ćwiczeń

- Nanotechnologia, fotonika i mikroelektromechanika, 15 + 10 godzin (wykład + ćwiczenia)

- Zaawansowane materiały (studia II st. ZMIN) 12 + 6 godzin (wykład + ćwiczenia)

2019/2020 - Podstawy fizyki: Elektryczność i magnetyzm MT 45 godzin ćwiczeń

- Nanotechnologia, fotonika i mikroelektromechanika, 15 + 10 godzin (wykład + ćwiczenia)

- Zaawansowane materiały (studia II st. ZMIN) 12 + 6 godzin (wykład + ćwiczenia)

- II Pracownia fizyczna, 22,5 godziny + pomoc w przygotowaniu nowego stanowiska – układu szczypiec optycznych - przygotowałem samodzielnie oprogramowanie sterujące i dokonujące akwizycji danych.

2018/2019 - Podstawy fizyki: Elektryczność i magnetyzm MT 45 godzin ćwiczeń

- Nanotechnologia, fotonika i mikroelektromechanika, 15 + 10 godzin (wykład + ćwiczenia)

- Systemy czasu rzeczywistego 60 (2x 30) godzin ćwiczeń

- II Pracownia fizyczna, 22,5 godziny

- Pracownia Metod Fizycznych Biologii II 45 godzin
- 2014/2015 - pracownia specjalistyczna dla ZMiN (studia II st.) - przygotowanie ćwiczenia z laserem Nd:YAG
- 2012/2013 - wykład (16 godzin) i ćwiczenia (8 godzin) „Materiały Fotoniczne” w ramach przedmiotu „Zaawansowane materiały (studia II st. ZMIN)”
- 2010/2011 - uczestnictwo w projekcie „Liga Fizyczna” w ramach projektu FENIKS, 15 godzin
- 2009/2010 - ćwiczenia do wykładu „Fizyka” dla Chemii, 30 godzin
- I Pracownia Fizyczna dla Chemii, 30 godzin
- I Pracownia Fizyczna - pomoc dla kierownika, 15 godzin
- 2008/2009 - demonstracje do wykładu „Elektromagnetyzm i optyka” dla Biofizyki, 30 godzin
- I Pracownia Fizyczna dla Chemii, 30 godzin
- Warsztaty Fizyki Teoretycznej, 18 godzin
- 2007/2008 - demonstracje do wykładu „Optyka” dla Fizyki, 30 godzin
- pracownia specjalistyczna dla IV roku Inżynierii Materiałowej, 60 godzin

Opieka nad pracami licencjackimi/magisterskimi/doktorskimi - pełniłem rolę:

- promotora pomocniczego w rozprawie doktorskiej dra K. Sycza (2015 r.)
- opiekuna naukowego w 2 pracach magisterskich - w 2020 r. i 2022 r.
- opiekuna naukowego w 6 pracach licencjackich - po dwie w 2015, 2018 i 2019 r.

Wszystkie powyżej wymienione prace zostały pozytywnie obronione. Ponadto pełniłem także rolę recenzenta prac dyplomowych: 7 licencjackich i 1 magisterskiej.

Moim największym osiągnięciem organizacyjnym jest urządzenie nowoczesnego laboratorium spektroskopii centrów barwnych NV w diamencie, które wyposażyłem w komercyjny laserowy mikroskop konfokalny, generatory mikrofalowe (w tym generator arbitralny o paśmie 10 GHz) oraz elektronikę do precyzyjnych synchronizacji i badania korelacji czasowych. Wartość zakupionej przeze mnie w ostatnich 3 latach aparatury przekroczyła 2 mln zł.

Byłem też w trzysobowym zespole, który zaprojektował i skonstruował pierwszy polski mikroskop wykorzystujący stymulowane rozpraszanie Ramana (SRS) na Wydziale Chemii UJ. Za to osiągnięcie zostaliśmy uhonorowani Nagrodą Miasta Krakowa w 2022 roku.

Pełniłem rolę Sekretarza i współorganizatora 50. jubileuszowej konferencji EGAS - European Group on Atomic Systems (Kraków, 9-13.07.2018).

W ostatnich latach kilkakrotnie brałem także udział w tworzeniu materiałów promocyjnych dla Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej (WFAIS) UJ i Krajowego Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej (KL FAMO) w Toruniu - wypowiedzi w nagranych spotach oraz nagrania i zdjęcia z moich laboratoriów.

Nawiązałem także formalną współpracę pomiędzy UJ a firmą ORCA Computing Private Limited (Oksford, Wielka Brytania) w celu rozwijania nowatorskiej platformy światłowodowej do budowy atomowych pamięci kwantowych.

W aspekcie popularyzacji nauki wygłosiłem następujące referaty popularno-naukowe (bez wystąpień konferencyjnych i seminariów):

- „Blżej Nauki: Diament - magnetyczny mikroskop” – kanał WFAIS UJ na platformie YouTube, 8.11.2022
- „Blżej Nauki: Diamenty – najlepsi przyjaciele kobiet i nie tylko” – kanał WFAIS UJ na platformie YouTube, 8.6.2021
- „Narzędzia wykonane ze światła - Nagroda Nobla z fizyki 2018”, wspólnie z prof. Krzysztofem Dzierżgą - moja część wykładu dotyczyła części przypadającej dla Artura Ashkina, konwersatorium PTF, Uniwersytet Śląski, Katowice, 29.11.2018
- „Narzędzia wykonane ze światła - Nagroda Nobla z fizyki 2018”, wspólnie z prof. Krzysztofem Dzierżgą - moja część wykładu dotyczyła części przypadającej dla Artura Ashkina, konwersatorium PTF, UJ, Kraków, 22.11.2018
- „Measurement and imaging of biological magnetic fields using NV- centers in diamond”, konwersatorium PTF, UJ, Kraków, 22.03.2018
- „Doświadczenia nad superpozycjami stanów kwantowych w zimnych gazach atomowych”, konwersatorium PTF, UJ, Kraków, 23.05.2013
- „Atomy w stanie superpozycji kwantowej. Zastosowania w ultraprecyzyjnej magnetometrii”, referat dla Koła Naukowego Fizyków, Uniwersytet Wrocławski, 10.12.2009
- „Najniższe temperatury we Wszechświecie”, referat dla finalistów olimpiady fizycznej, UJ, 27.05.2009

Jestem też autorem następujących artykułów popularno-naukowych i dydaktycznych:

- „W poszukiwaniu najniższych temperatur”, Foton 126, 18-22 (2014)
- „Szczypce optyczne : Nagroda Nobla 2018”, Foton 143, 45-50 (2018)

7. **Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.**

.....
(podpis wnioskodawcy)