



Prof. dr hab. inż. Grzegorz Sęk

Wrocław, 15.02.2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Marii Gieysztor  
pt. „Diamond-based fundamental research on light-matter interaction  
with single photons”**

Przedstawiona mi do zaopiniowania rozprawa doktorska pani mgr Marii Gieysztor dotyczy badań oddziaływania światło-materia w kryształach diamentu intencjonalnie domieszkowanych azotem, skoncentrowanych na oddziaływaniu pojedynczych fotonów z defektowymi centrami barwnymi typu NV (azot-wakancja), a w szczególności na dynamice emisji w kontekście zaobserwowania efektu tzw. nadpromienistości (*ang. superradiance*) jednofotonowej. Praca obejmuje ponad 120 stron i napisana jest w języku angielskim. Rozpoczyna się krótkim wprowadzeniem do tematyki rozprawy, w którym omówiono aktualny stan wiedzy w zakresie podjętych badań, zdefiniowano cele pracy, omówiono strukturę pracy i opisano wkład autorki w poszczególne części badań. Po tym następuje rozdział wyjaśniający pojęcie pojedynczego fotonu, procesy generacji pojedynczych fotonów, w tym w szczególności poprzez mechanizm spontanicznego parametrycznego podziału częstości (*ang. sponatenous parametric down-conversion – SPDC*) oraz podstawowe typy detektorów jednofotonowych. Rozdział trzeci jest wprowadzeniem nt. centrów barwnych NV w diamencie, elektronowej struktury energetycznej takich stanów i widmach ich emisji. W drugiej jego części omówiono wysokorozdzielcze techniki mikroskopowe i spektroskopowe, z których autorka korzysta potem w części doświadczalnej pracy. Rozdział piąty opisuje podstawy teoretyczne oddziaływania światło-materia na gruncie kwantowym, dla pojedynczego emitera dwupoziomowego lub ich zbioru. Wprowadzono w nim również pojęcia nadpromienistości Dicke’a oraz nadpromienistości jednofotonowej.

Rozdziały 4, 6 i 7 zawierają wyniki własne pani mgr Gieysztor. Pierwszy z nich stanowi artykuł A2, w którym wszystkie obliczenia, analityczne i numeryczne, wykonane zostały przez doktorantkę, a dotyczy on podstaw teoretycznych metody mikroskopowej z zastosowaniem tzw. kwantowego obrazowania koincydencyjnego (*ang. quantum ghost imaging*), gdzie źródłem oświetlenia są pary fotonów generowanych w procesie SPDC. Skorelowane pary fotonów (*ang. heralded photons*) opisane dwufotonową gaussowską funkcją falową, analizowane są na różnych etapach propagacji w układzie optycznym w sensie profili intensywności oraz fazy. Rozważania analityczne wsparte są obliczeniami numerycznymi dla realistycznych parametrów układu optycznego oraz dyskusją nt. wpływu takich czynników jak



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wroclawska

Wydział Podstawowych Problemów  
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79  
F: +48 71 328 36 96

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



skończone rozmiary elementów optycznych oraz powierzchni czynnej detektorów. Przedyskutowano znaczenie splatania przestrzennego par fotonów oraz pokazano, że rozdzielczość przestrzenna tej metody mikroskopowej zależy nie tylko od rozkładu przestrzennego modu, ale także od jego fazy. Pokazano w jakich warunkach możliwe jest uzyskanie limitu dyfrakcyjnego rozdzielczości przy jednoczesnej maksymalizacji stosunku sygnał-szum (transmisji przez obiektyw) w takim eksperymencie. Wykazano także, że manipulacja rozdzielczością przestrzenną jest możliwa dzięki starannemu przygotowaniu amplitudy i fazy modu przestrzennego fotonu na wejściu do obiektywu mikroskopowego.

Na rozdział szósty składa się artykuł A1. W pracy tej pani mgr Gieysztor odpowiedzialna była za skonstruowanie układu mikroskopowego, wykonanie części pomiarów oraz ich analizę i interpretację. Artykuł dotyczy badań nad oddziaływaniem pomiędzy pojedynczymi fotonami i zbiorem centrów barwnych (koncentracja ponad  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), poprzez detekcję szybkości zaniku emisji wzbudzonej pojedynczymi fotonami, generowanymi w sposób skorelowany ze źródła SPDC. Długość fali fotonów wbudzających była przestrajana w zakresie absorpcji centrów NV<sup>-</sup>, gdzie do nierezonansowego pobudzenia wykorzystano szerokie pasmo fononowe, co pozwoliło wyeliminować trudność eksperymentalną związaną z dokładnym dopasowaniem wąskiej linii wbudzenia do przejścia elektronowego. Wyznaczono zanik intensywności fotoluminescencji od czasu dla dwóch różnych częstotliwości generacji pojedynczych fotonów (gęstości mocy), z których na podstawie dopasowania zależnością teoretyczną wyznaczono szybkość emisji (czasy charakterystyczne rzędu 7 ns) oraz stałą czasową procesów niepromienistych, która *de facto* determinuje szybkość relaksacji po wzbudzeniu do stanu emitującego. Uzyskane czasy charakterystyczne procesu promienistego są nieco krótsze niż podawane przez innych autorów dla przypadku pobudzenia wiązką laserową, gdzie za prawdopodobną przyczynę podano fakt niegenerowania polaryzacji spinowej przy pobudzeniu jednofotonowym, oraz możliwy transfer dipolowy wzbudzenia pomiędzy różnymi centrami w próbce o dużej gęstości. Oba argumenty brzmią raczej spekulacyjnie, dlatego też interesującym byłoby wysłuchać szczegółowszego wyjaśnienia tego wątku podczas obrony. Szczególnie, że czasy promieniste uzyskane przez autorkę w pomiarze referencyjnym z pobudzeniem laserowym są nawet krótsze, ok. 6.6 ns.

Nie jest też jasnym na jakiej podstawie autorka pisze czasami, że bada emisję z pojedynczego centrum. W pojedynczym procesie absorpcji w istocie wbudzane jest jedno centrum (przy założeniu braku mechanizmów kolektywnych), ale kolejne fotony wbudzają losowo inne centra z całej próbkowanej objętości, a rezultat jest uśrednieniem odpowiedzi z całego zbioru. Swoją drogą interesującym byłoby poznać oszacowanie ile centrów znajduje się w objętości wybudzenia w tych warunkach eksperymentalnych i przy tej gęstości defektów NV, a także bardziej ilościową analizę nt. granicznej koncentracji defektów w tych warunkach pobudzenia, aby być pewnym,



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wroclawska  
Wydział Podstawowych Problemów  
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79  
F: +48 71 328 36 96

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



że przez cały czas trwania pomiaru wzbudzany będzie zawsze jeden, i ten sam defekt (o czym na poziomie ogólnym wzmiankowano w podsumowaniu pracy).

Jednym z ważnych praktycznych rezultatów tej publikacji było pokazanie, że można uzyskać poprawę stosunku sygnał-szum (*ang. signal to noise ratio – SNR*) dzięki detekcji wyłącznie aktów emisji wbudzanej fotonami skorelowanymi. Zasugerowano także dalszą poprawę SNR poprzez np. zastosowanie detektora o mniejszej powierzchni i dzięki temu zmniejszenie liczby zliczeń ciemnych. Wreszcie, przedyskutowano wydajność takiego sposobu wzbudzania, czyli konwersji liczby fotonów wbudzających do emitowanych, która okazała się być bardzo niska. Zaproponowano możliwe modyfikacje eksperymentalne mogące prowadzić do jej znaczącej poprawy (nawet o kilka rzędów).

Rozdział 7 jest niejako kolejnym etapem prac nad oddziaływaniem pola pojedynczego fotonu z niewielką liczbą centrów NV, w pierwszej części z jednym lub dwoma, w dalszej ze zbiorem  $N$  centrów (dzięki zastosowaniu kryształów o różnej gęstości centrów), w poszukiwaniu potwierdzenia eksperymentalnego efektu nadpromienistości jednofotonowej. W tych badaniach kandydatka koordynowała wszystkie prace, a osobiście odpowiedzialna była za zaprojektowanie układów pomiarowych i skonstruowanie układu konfokalnego, również w wersji kriogenicznej, oraz za analizę wszystkich uzyskanych rezultatów. Niestety ostatecznie nie zaobserwowano jednoznacznych zmian w pomiarach dynamiki zaniku fotoluminescencji, które by potwierdzały nadpromienistość, bez względu na schemat pobudzania ani liczbę pobudzanych centrów. Skrócenie czasu zaniku dla przypadków gdy pobudzano zbiór centrów ulokowanych bliżej powierzchni wytłumaczono wpływem stanów powierzchniowych. Za jedną z podstawowych przyczyn nieuzyskania jednoznacznego potwierdzenia nadpromienistości wskazano zbyt niski stosunek sygnał-szum przy pobudzaniu pojedynczymi fotonami. Zaproponowano scenariusze poprawy SNR w takich pomiarach, zarówno po stronie przygotowania próbki jak i poprawy wydajności pobudzania i detekcji. Jednym z elementów wartych wyjaśnienia na obronie jest dlaczego pomiary na próbce niskiej gęstości wykonywano w temperaturze pokojowej, podczas gdy dostępna była możliwość pomiarów kriogenicznych, z której skorzystano w pozostałych przypadkach, co mogło mieć też wpływ na uzyskany SNR. Nie jest też jasnym, dlaczego, jak to opisano w podrozdziale 7.3.1, możliwe było sterowanie głębokością pobudzania, za pomocą układu konfokalnego jak można domniemywać, dla próbki niskiej gęstości ( $10 \mu\text{m}$  od powierzchni), a nie dla próbki o wysokiej koncentracji centrów? Natomiast przy opisie zmierzonych funkcji  $g^{(2)}(t)$  na rys. 7.5, napisano, że wyraźnie widoczny jest „bunching anti-nunching behavior”. Trzeba przyznać, że w pokazanym oknie czasowym jest trudno jednoznacznie stwierdzić, czy mamy do czynienia z bunchingiem, czy jest to tylko nieprawidłowo unormowana wartość funkcji  $g^{(2)}$ , która dla długich opóźnień powinno dążyć do 1? Ciekawym byłoby też szersze omówienie stabilności w czasie



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wroclawska  
Wydział Podstawowych Problemów  
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79  
F: +48 71 328 36 96

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



pomiarów przy pobudzaniu jednofotonowym, czyli pomiarach charakteryzujących się niskimi intensywnościami i jednocześnie koniecznością rejestracji przez wiele godzin. Jest co prawda zaprezentowana metoda sprzężenia zwrotnego, „śledząca” dane miejsce pobudzania na podstawie poziomu sygnału fluorescencji, dla ona może zostać zastosowana jedynie przy pobudzaniu laserowym. Jak rozwiązano ten problem przy niskich sygnałach i pobudzaniu jednofotonowym?

Praca zakończona jest krótkim podsumowaniem najważniejszych rezultatów, a po nim załączono jeszcze oświadczenia współautorów. Praca jest w ogólności napisana poprawnie merytorycznie i językowo, a trudne zagadnienia przedstawione przejrzysto i bardzo przystępnie. Autorka nie ustrzegła się jednak kilku (bardzo niewielu) potknięć lub niejasności językowych lub edytorskich, przykłady których z obowiązku recenzenta podaję poniżej:

- Str. 20 ostatni akapit: „a SPS” → (an SPS)
- Str. 32, początek rozdziału 3.1. Napisano, że węgiel w postaci stałej występuje w dwóch formach, diamentu i grafitu, co jest co najmniej nieścisłością. Istnieje kilka innych form alotropowych węgla.
- W pracy A2 występuje zamieszanie w oznaczeniach linii na rysunku nr 3. W podpisie napisano „Light grey, solid ( $T(\sigma_{mid})$  in the non-heralded scenario”, ale na wykresach brak jest takiej linii. Z opisu w tekście zaś czytamy „3) transmission of the wavepacket through the MO in the non-heralding scenario (light-grey, dashed), and 4) transmission of the wavepacket through the MO in the heralding scenario (dark-grey, dashed)”. Jednakże na obu rysunkach [również na 3(b) gdzie mamy dwie różne zależności dla  $\sigma_{out}(\sigma_{mid})$ ] jest tylko jeden szary wykres  $T(\sigma_{mid})$  oznaczony linią przerywaną?
- W rozdziale 6, wyznaczono czasy niepromieniste/relaksacji, które można oczekiwać, że powinny być znacznie krótsze (tutaj podano, że na poziomie 100 ps dla pobudzania jednofotonowego). Jednak dla pomiaru referencyjnego z pobudzaniem laserowym podano wartość 127 ns, która jest najprawdopodobniej omyłką pisarską?
- Czytelność rysunku 7.10, gdzie nałożono 7 podobnych przebiegów czasowych utrudnia czytelnikowi analizę porównawczą poszczególnych przypadków.
- W przypisie na str. 91 pojawia się zapowiedź wysłania do druku publikacji z części wyników rozdz. 7, jednak takowej pracy nie znalazłem?

**W podsumowaniu chciałbym podkreślić, iż wymienione drobne wątpliwości merytoryczne, wynikające głównie z ciekawości czytającego, ani też usterki redakcyjne, nie obniżają dużej wartości naukowej uzyskanych przez**



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wroclawska  
Wydział Podstawowych Problemów  
Techniki

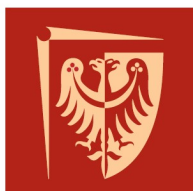
Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79  
F: +48 71 328 36 96

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



panią mgr Marię Gieysztor rezultatów, których część stała się podstawą dwóch publikacji w uznanym czasopiśmie *Optics Express*. Poszerzają one nie tylko naszą wiedzę na temat oddziaływania światła na gruncie kwantowym z centrami barwnymi w diamencie oraz dynamiki emisji przy pobudzaniu pojedynczymi fotonami, ale też dają solidne podwaliny doświadczalne do dalszych badań z udziałem kontrolowanej liczby centrów oraz możliwości zaobserwowania tzw. nadpromienistości jednofotonowej w układzie na ciele stałym. Rozprawa bez wątpienia stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a jej treść jednoznacznie potwierdza, że kandydatka posiada ugruntowaną ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie nauk fizycznych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Powyższe wypełnia wymogi określone w art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (z późn. zm.). Dlatego też z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie mgr Marii Gieysztor do dalszych etapów postępowania doktorskiego.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Politechnika Wroclawska

Wydział Podstawowych Problemów  
Techniki

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

T: +48 71 320 25 79  
F: +48 71 328 36 96

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