

Podsumowanie osiągnięć zawodowych - Autoreferat

Dr Tomasz Jakubczyk

Spis treści

1	Imię i nazwisko	2
2	Stopnie naukowe i dyplomy	2
2.1	Stopnie doktorskie	2
2.2	Tytuł magistra	2
3	Zatrudnienie w instytucjach naukowych:	2
4	Opis osiągnięcia	2
4.1	Tytuł osiągnięcia naukowego: „Postępy w tworzeniu i badaniu koherencji optycznej w układach ciała stałego”	2
4.2	Streszczenie	3
4.3	Wprowadzenie	3
4.3.1	Czym jest koherencja oraz dlaczego jest dla nas istotna?	3
4.3.2	Metodologia: Jak mierzyć spójność emiterów półprzewodnikowych?	4
	Znaczenie wzbudzenia (kwazi)rezonansowego dla spójności	4
	Rodzaje pobudzania (kwazi)rezonansowego:	5
	Detekcja sygnału spójnego za pomocą mieszania czterech fal – eliminacja rezonansowego tła laserowego	6
4.4	Spójność w kropkach kwantowych	6
4.4.1	Stan wiedzy i wyzwania przed moim wkładem w tę dziedzinę	6
4.4.2	Mój wkład	7
	Gigantyczna odpowiedź koherentna pojedynczych kropek kwantowych InAs osadzonych w fotonicznych trąbkach	7
	Wpływ fononów na dekoherencję pojedynczych ekscytonów w deterministycznych mikrosoczewkach z kropkami kwantowymi	8
	Postępy w koherentnej spektroskopii nieliniowej pojedynczych magnetycznych kropek kwantowych	9
4.5	Spójność w dichalkogenkach metali przejściowych (TMD)	10
4.5.1	Pytania badawcze i stan wiedzy przed moim wkładem w dziedzinę	10
4.5.2	Mój wkład	10
	Koherencja ograniczona radiacyjnie w MoSe ₂	11
	Osiągnięcie granicy jednorodności w MoS ₂ enkapsulowanym w hBN.	12
	Kontrola koherencji w WS ₂ za pomocą oddziaływań środowiskowych.	12
	Spójność dolinowa.	12
4.6	Spójność w centrach defektów atomowych	12
4.6.1	Pytania badawcze i stan wiedzy przed moim wkładem w dziedzinę	13
4.6.2	Mój wkład	14
	Centra NV o niskim poziomie szumu	14
	Emitory w GaN o zmniejszonym poszerzeniu niejednorodnym	15
4.7	Podsumowanie osiągnięć	15
4.8	Obecny i przyszły plan badań (podsumowanie, horyzont 3–5 lat)	16
	Cel.	16
	Podejście i oryginalność.	16
	Aktualny stan i zasoby.	16
4.9	Dodatek	21
4.9.1	Spójność w układzie dwupoziomym — definicje terminów użytych w niniejszej pracy habilitacyjnej	21
	Defazowanie i stany mieszane.	21

4.9.2	Technika mieszania czterech fal do oceny spójności	22
5	Informacje dotyczące wykazania znaczącej działalności naukowej lub artystycznej prowadzonej w więcej niż jednej uczelni, instytucji badawczej lub instytucji kulturalnej, w szczególności za granicą.	23
6	Informacje na temat osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych oraz w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki.	24
7	Inne informacje uważane za istotne dla mojej kariery zawodowej	25

1 Imię i nazwisko

Tomasz Jakubczyk

2 Stopnie naukowe i dyplomy

2.1 Stopnie doktorskie

Stopień doktora w systemie „co-tutelle”:

2014- Dyplom doktora (summa cum laude), „Wpływ ograniczenia fotonicznego na emisję z kropek kwantowych CdTe”,
promotorzy:
prof. Piotr Kossacki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski,
oraz prof. Detlef Hommel, Instytut Fizyki Ciała Stałego, Uniwersytet w Bremie (Niemcy)

2.2 Tytuł magistra

„Wpływ środowiska fotonicznego na spontaniczną emisję światła z kropki kwantowej”, Wydział Fizyki
Promotor: prof. Jan Gaj
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

3 Zatrudnienie w instytucjach naukowych:

od 2024 r. Adiunkt, stanowisko stałe, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
2020–2024 Adiunkt, kierownik projektu w ramach programu NAWA „Powroty”, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
2017–2020 Stypendysta, indywidualne stypendium Marie Skłodowska-Curie Actions, Uniwersytet w Bazylei
2014–2017 Doktorant, uczestnik projektu: ERC Starting Grant kierowanego przez dr. Jacka Kasprzaka, Instytut Néela, CNRS, Grenoble, Francja

4 Opis osiągnięcia

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego: „Postępy w tworzeniu i badaniu koherencji optycznej w układach ciała stałego”

Opisane tutaj osiągnięcie to seria publikacji naukowych oznaczonych jako TJ1-TJ9. W poniższych sekcjach opisuję artykuły i osiągnięcia bardziej szczegółowo.

4.2 Streszczenie

Praca habilitacyjna przedstawia badania spójności emisji z półprzewodnikowych źródeł światła kwantowego w trzech różnych układach materiałowych. Obejmują one samoorganizujące się kropki kwantowe (z ang. *Quantum Dots* - QDs), monowarstwy dichalkogenków metali przejściowych (z ang. *Trans-*

ition Metal Dichalcogenides - TMDs) oraz centra barwne w materiałach o szerokiej przerwie energetycznej. Dla każdego z układów użyto dopasowanych, specjalistycznych metod eksperymentalnych. W badaniach wykorzystano mikrospektroskopię mieszania czterech fal (a ang. *Four Wave Mixing* - FWM) z heterodynową interferometrią spektralną do badania kropek kwantowych i monowarstw dichalkogenków metali przejściowych poprzez (i) znalezienie metod wykonywania spektroskopii koherentnej za pomocą deterministycznej mikrooptyki, (ii) wykrywanie i pomiar mechanizmów defazowania indukowanego fononami w poszczególnych QD oraz (iii) wskazując granice defazowania radiacyjnego w monowarstwach TMD, które tworzą fundamentalny limit czasowy dla spójności w oparciu o czas życia ekscytynu ($T_2 \approx 2T_1$).

W badaniach wykorzystuje się kriogeniczne, rezonansowe techniki spektroskopii do badania centrów barwnych utworzonych w diamencie za pomocą zapisu laserowego (ang. *laser writing*) przy użyciu immersyjnych soczewek (z ang. *Solid Immersion Lenses* - SILs). W rezultacie obserwuje się wąskie, stabilne linie optyczne świadczące o zredukowanym szumie ładunkowym. Wyniki eksperymentów oddzielają jednorodne od niejednorodnych efektów poszerzenia emisji optycznej, i przyczyniają się do rozwoju źródeł nierozróżnialnych fotonów i interfejsów spin-foton.

Metoda analizy FWM poszczególnych emiterów półprzewodnikowych pozwala mierzyć mechanizmy zaniku T_2 , prowadząc do opracowania metod stabilizacji szerokości linii spektralnych. Badania wykazują dwie charakterystyczne skale czasowe i rozróżniają procesy zaniku populacji od szybkich procesów dyfuzji spektralnej. Badania centrów barwnych ujawniają szum ładunkowy wynikający z fabrykacji mikrostruktur. Szum ogranicza ich zastosowania w sieciach kwantowych, ponieważ determinuje maksymalną widoczność interferencji Hong-Ou-Mandla. Centra charakteryzujące się zredukowanym szumem ładunkowym umożliwiają zarówno zastosowania nanofotoniczne dzięki efektowi Purcella, jak i sterowanie elektryczne. Badania przyczyniają się do rozwoju źródeł na zintegrowanych chipach, które to źródła emitują stabilne, nierozróżnialne fotony z dużą częstotliwością, mające zastosowanie w podstawowych badaniach materiałowych i rozwoju kwantowych sieci fotonicznych.

4.3 Wprowadzenie

4.3.1 Czym jest koherencja oraz dlaczego jest dla nas istotna?

Na długo przed sformułowaniem formalnych koncepcji spójności optycznej „magia” interferencji fascynowała naukowców. Na początku XIX wieku eksperyment Thomasa Younga z podwójną szczeliną wykazał, że fale świetlne mogą się nakładać, tworząc jasne i ciemne prążki, co dowodzi, że pola docierające dwiema ścieżkami zachowują dobrze zdefiniowaną fazę względną w odpowiednich skalach przestrzennych i czasowych. Dzisiaj nazywamy ten rodzaj wzajemnego wyrównania *spójnością optyczną pierwszego rzędu*. W ciągu następnych dziesięcioleci odkryliśmy, że badając, w jaki sposób fale świetlne zachowują synchronizację w czasie i przestrzeni, możemy uzyskać bezpośredni dostęp do właściwości kwantowo-mechanicznych źródeł światła. Spójność optyczna pierwszego rzędu determinuje, w jaki sposób dipol emitera w jednym momencie jest statystycznie powiązany (lub „pozostaje powiązany fazowo”) z dipolami w innym momencie. Korelacje te są regulowane przez czas koherencji emitera T_2 , dlatego eksperymenty z interferencją optyczną zapewniają bezpośredni wgląd w mechanizmy dekoherencji zakodowane w dynamice emitera. Badanie koherencji kwantowej umożliwia naukowcom obserwację istotnych interakcji półprzewodników, w tym sprzężenia fononowego i efektów defazowania wynikających ze zmian ładunku w otoczeniu, które ujawniają podstawowe zasady fizyki regulujące zachowanie emitera.

Czas koherencji emitera T_2 (dokładne definicje terminów użytych w niniejszym dokumencie znajdują się w załączniku 4.9.1) jest ograniczony przez zanik promienisty oraz czyste defazowanie i wyznacza górną granicę czasu koherencji optycznej emitera. Ma on silny wpływ na nierozróżnialność wymaganą dla wysokiej widoczności interferencji dwufotonowej, która z kolei jest niezbędna do wielofotonowych efektów interferencji kwantowej, takich jak efekt Honga-Ou-Mandla (HOM) [1]. Efekt HOM stanowi podstawę liniowego optycznego przetwarzania informacji kwantowej, [2] umożliwiając interferencję dwufotonową o wysokiej widoczności, która jest głównym zasobem do realizacji operacji splątania i (częściowych) pomiarów stanu Bella za pomocą optyki liniowej. Podobnie protokoły komunikacji kwantowej, takie jak wymiana splątania [3], i teleportacja kwantowa, [4], wymagają wysokiej nierozróżnialności fotonów, ponieważ pomiar stanu Bella o wysokiej wierności opiera się na idealnej

interferencji dwóch fotonów na płycie światłodzieliącej.

W półprzewodnikach spójność można wywołać poprzez wzbudzenie materiału spójnym światłem, takim jak lasery. W półprzewodnikach objętościowych i warstwowych, a także w studniach kwantowych, naświetlanie to generuje pary elektron-dziura, które przyciągają się nawzajem, tworząc ekscytyny. Zdolność do kontrolowania i utrzymywania stałych relacji fazowych między kwantowymi stanami defektów atomowych umożliwia tym defektom działanie jako kontrolowane dwupoziomowe układy kwantowe.

W kropkach kwantowych w najprostszych przypadkach dwa poziomy mechaniki kwantowej odnoszą się do obecności (stan wzbudzony) lub braku (stan podstawowy) pojedynczej pary elektron-dziura, uwięzionej w tych nanostrukturach. Pary te posiadają moment dipolowy, umożliwiając oddziaływanie ze światłem, i zazwyczaj ulegają anihilacji poprzez emisję fotonu w skali nanosekundowej. Zarówno defekty atomowe, jak i zwłaszcza kropki kwantowe są cennymi zasobami do generowania pojedynczych fotonów na żądanie — kluczowego elementu w zastosowaniach kwantowych, które opierają się na splątaniu i nierozróżnialności fotonów. Jednak utrzymanie spójności ma fundamentalne znaczenie dla zachowania superpozycji kwantowej i splątania, które są niezbędne do wydajnego i niezawodnego działania urządzeń kwantowych.

4.3.2 Metodologia: Jak mierzyć spójność emiterów półprzewodnikowych?

Historycznie rzecz biorąc, badania nad *spójnością pierwszego rzędu* rozpoczęły się od klasycznych eksperymentów optycznych, w szczególności poprzez wykorzystanie interferometru Michelsona. Michelson opracował swój interferometr przede wszystkim w celu wykrywania niewielkich różnic w długości ścieżki optycznej. Później ta sama koncepcja interferometru została zaadaptowana do pomiaru *długości spójności* nowych źródeł światła, takich jak lampy wyładowcze, oraz laserów. Wraz z postępem w dziedzinie półprzewodników i elektroniki kwantowej w połowie XX wieku naukowcy wykorzystali interferometry typu Michelsona do pomiaru szerokości linii emisyjnej i czasu spójności laserów półprzewodnikowych (np. GaAs), a następnie rozszerzyli te pomiary na przejścia ekscytonowe w studniach kwantowych. Wraz z odkryciem kropek kwantowych i innych struktur niskowymiarowych interferometr Michelsona został ponownie udoskonalony. Fotoluminescencja próbki (PL) jest często zbierana i wysyłana do interferometru. Zmieniając różnicę dróg w jednym ramieniu, uzyskuje się wzór interferencyjny, którego widoczność maleje, gdy opóźnienie drogi przekracza czas koherencji emitera.

Wariant koncepcji Michelsona, interferometr Macha-Zehndera, wykorzystuje oddzielne płytki światłodzieliące do rozdzielania i ponownego łączenia wiązki, zapewniając zazwyczaj lepszą kontrolę nad polaryzacją. W eksperymentach z ciałami stałymi można go skonfigurować do konfiguracji dla wiązki swobodnej lub takiej opartej na światłowodach. Skanując względne opóźnienie między dwoma ramionami, można bezpośrednio zmierzyć *stopień koherencji pierwszego rzędu*, powszechnie oznaczany jako $g^{(1)}(\tau)$. Sygnał zachowuje wysoką widoczność w okolicy opóźnienia zerowego i wykazuje stopniowy spadek wraz ze wzrostem czasu opóźnienia, co wskazuje na zanik koherencji.

Wraz z rozwojem źródeł pojedynczych fotonów w określonych warunkach zarówno interferometry Macha-Zehndera, jak i Michelsona mogą dostarczać informacji o szybkości dekoherencji, ponieważ umożliwiają pomiar zaniku spójności fazowej (pierwszego rzędu) w czasie. Jednak w przypadku wzbudzenia nierezonansowego nadmiar nośników i procesy fononowe silnie przyspieszają dekoherencję, prowadząc do poszerzenia emisji i zmniejszenia nierozróżnialności fotonów. Nierozróżnialność fotonów jest bezpośrednio określana przez czas koherencji optycznej emitera: tylko fotony emitowane w czasie koherencji mają dobrze zdefiniowaną fazę i częstotliwość, co pozwala im interferować kwantowo-mechanicznie. Motywuje to do stosowania wzbudzenia rezonansowego lub kwazirezonansowego, które minimalizuje szumy środowiskowe i pozwala zmierzyć lub wykorzystać koherencję emitera.

Znaczenie wzbudzenia (kwazi)rezonansowego dla spójności Zastosowanie metod kontroli spójności (np. wzbudzenia kwazirezonansowego lub p-powłokowego, w przypadku kropek kwantowych) zazwyczaj zapewnia lepszy wgląd w mechanizmy dekoherencji emiterów pojedynczych fotonów niż scenariusze czysto nierezonansowe lub słabo wzbudzone z powodów wymienionych poniżej.

Deterministyczne przygotowanie stanu kwantowego Koherentne sterowanie umożliwia bezpośrednią kontrolę nad stanem kwantowym emitera i ułatwia stosowanie technik — takich jak

oscylacje Rabiego lub pomiary echa fotonowego — które ujawniają skale czasowe i procesy odpowiedzialne za defazowanie. Ponieważ stan superpozycji pojedynczego kubitu zależy zarówno od amplitudy, jak i fazy, celem sterowania koherentnego jest kształtowanie pola sterującego — dostosowanego pod względem amplitudy i fazy. Pozwala to na osiągnięcie pełnej kontroli nad jego stanem kwantowym, czyli pozycją i trajektorią na sferze Blocha.

Zmniejszenie szumu środowiskowego Wzbudzenie dalekie od rezonansu często może prowadzić do szybszego rozfazowania (lub szerszych szerokości linii) w porównaniu z pompowaniem rezonansowym lub prawie rezonansowym. Wynika to z faktu, że wzbudzenie nierezonansowe zazwyczaj wprowadza do układu dodatkowe nośniki i fonony, które mogą zwiększać szum i wzmacniać zjawiska rozpraszania, które pogarszają spójność fazową.

Rodzaje pobudzania (kwazi)rezonansowego: • **Manipulowanie ekscytonami powłoki p.** W najwcześniejszych demonstracjach spójnej kontroli optycznej w półprzewodnikowych kropkach kwantowych naukowcy skupiali się na manipulowaniu ekscytonami powłoki p [5, 6].

• **Pomiar fotoprądu.** W przypadku pojedynczych kropek kwantowych spektroskopię rezonansową można również przeprowadzić poprzez pomiar fotoprądu. Pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego fotonosniki powstałe w kropce tunelują i są wykrywane jako zmiany fotoprądu rzędu kilku pA [7].

• **Wykrywanie fluorescencji rezonansowej.** Inna technika wykorzystuje rezonansowy laser sondowy do wzbudzenia przejścia optycznego i wykrywania powstałych niespójnych fotonów. Kluczowym wyzwaniem jest tutaj tłumienie rozproszonego lasera sterującego. We wczesnych eksperymentach stosowano zbieranie pod kątem normalnym ze wzbudzeniem pod kątem [8], w połączeniu z filtrowaniem przestrzennym i polaryzacyjnym. Później wnęka o niskim współczynniku dobroci Q dodatkowo zmniejszyła rozpraszanie lasera docierające do detektorów [9].

• **Wzbudzenie osi odbicia z polaryzacjami ortogonalnymi.** Alternatywna konfiguracja fluorescencji rezonansowej wzbudza i zbiera wzdłuż tej samej osi odbicia, ale wykorzystuje polaryzacje ortogonalne. Wysokiej jakości polaryzator i etalon odfiltrowują rezonansowe światło laserowe, umożliwiając wykrywanie fotonów o nieznacznym przesunięciu energii — takich jak pasma boczne Rabiego tripletu Mollowa [10].

Ograniczenia standardowych technik oceny spójności Ograniczeniem wyżej wymienionych narzędzi spektroskopowych jest ich niezdolność do rozróżnienia między dekoherencją wywołaną rozpraszaniem a defazowaniem spowodowanym rozkładem częstotliwości oscylatora (tj. rozszerzeniem niejednorodnym, więcej szczegółów znajduje się w załączniku 4.9.1). W półprzewodnikach takie poszerzenie często wynika z nieuporządkowania strukturalnego — na przykład z różnic grubości studni kwantowych lub zmiennego w przestrzeni naprężenia. Natomiast techniki nieliniowe omówione w poniższym akapicie mogą ujawnić rzeczywistą szybkość dekoherencji spowodowanej rozpraszaniem, nawet w przypadku występowania rozszerzenia niejednorodnego, co jest główną motywacją do stosowania techniki echa fotonowego [11].

Technika echa fotonowego umożliwia badaczom badanie ukrytych procesów dekoherencji poprzez wykorzystanie refazowania koherentnych wzbudzeń w ośrodku. Pierwszy impuls laserowy w eksperymencie z dwoma impulsami echa fotonowego tworzy koherentną superpozycję stanów, które następnie są refazowane przez drugi impuls w celu wytworzenia sygnału echa pojawiającego się w późniejszym czasie. Sygnał ponownie emitowany w eksperymentach z fotonowym echem wykazuje wysoką wrażliwość na niejednorodne poszerzenie i wielokrotne mechanizmy defazowania. Sprawia to, że technika ta ma kluczowe znaczenie dla badania czasu życia koherencji i zrozumienia, w jaki sposób fundamentalne oddziaływania między elektronami i fononami oraz szum indukowany ładunkiem wpływają na stany kwantowe w półprzewodnikach.

Detekcja sygnału spójnego za pomocą mieszania czterech fal – eliminacja rezonansowego tła laserowego Stopień spójności można określić ilościowo, mierząc obecność relacji fazowej w czasie i przestrzeni między polem fizycznym emitowanym przez układ a polem odniesienia (laserem w

naszym eksperymencie FWM). Spójność mierzy się zatem za pomocą obserwowalnej polaryzacji, która odzwierciedla relację fazową między stanami kwantowymi.

W ciele stałym typowym przykładem emiterów dwupoziomowych są półprzewodnikowe kropki kwantowe, w których obecność lub brak pojedynczego spulapkowanego ekscytynu określa odpowiednie stany kwantowe. Ze względu na stosunkowo duży optyczny moment dipolowy wśród emiterów pojedynczych fotonów kropki kwantowe bardzo skutecznie oddziałują z rezonansowymi polami świetlnymi, co czyni je idealnymi platformami do spójnej kontroli optycznej. Skutecznym sposobem przygotowania i badania spójności w takich emiterach jest sterowanie przejściem optycznym za pomocą femtosekundowych impulsów laserowych, skupionych spektralnie na energii przejścia, oraz obserwacja następującej po nich emisji. Trudność w tym eksperymencie polega na tym, że intensywność lasera dominuje nad odpowiedzią kropek zazwyczaj o 10^{12} . Aby odfiltrować odpowiedź, a tym samym zmierzyć spójność, sięgamy po sprawdzone narzędzia spójnej spektroskopii nieliniowej.

Jednym ze sposobów odrzucenia tła jest zastosowanie następującej procedury. Wiązkę z lasera impulsowego dzielimy na trzy tory optyczne i modulujemy ich wzajemne fazy. Realizuje się to poprzez przepuszczenie każdego ciągu impulsów przez modulator akustooptyczny (AOM), który przesuwając częstotliwość optyczną odpowiadającą mu wiązki o ściśle zdefiniowane przesunięcie w zakresie częstotliwości radiowych (RF). Wzajemne oddziaływanie trzech tak przesuniętych częstotliwości w nieliniowym ośrodku (kropce kwantowej) prowadzi do wytworzenia nieliniowej polaryzacji oraz emisji znanej jako czterofalowe mieszanie (four-wave mixing, FWM, formalny opis wprowadzający znajduje się w dodatku 4.9.2). Proces wykrywania wymaga połączenia sygnału FWM z sygnałem odniesienia (oscylator lokalny) w celu określenia zarówno jego siły, jak i charakterystyki fazowej. Informacje spektralne sygnału FWM stają się widoczne we wzorze interferogramu, który służy jako narzędzie demodulacji do wyodrębnienia danych dotyczących polaryzacji nieliniowej. Pomiar polaryzacji FWM (i jej dynamiki) pojedynczego emitera jest możliwy dzięki technice heterodynowej interferometrii spektralnej (HSI) [12]. Poprzez dostrojenie pola impulsu optycznego (pulse area) system można deterministycznie przygotować w pożądaną spójną superpozycję w dowolnym punkcie w reprezentacji sfery Blocha. HSI umożliwia filtrowanie wybranego sygnału nieliniowego o wybranej częstotliwości z tła o innych częstotliwościach i emisji niespójnej (szumu). Aby odzyskać odpowiedź spektralną zarówno w amplitudzie, jak i fazie, stosuje się interferometrię spektralną [13]. Sygnał można odzyskać zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości.

Jako technika wieloimpulsowa, analiza zależności od opóźnienia czasowego między impulsami wzbudzającymi pozwala na badanie zaniku populacji lub spójności. Dzięki zjawisku echa fotonowego to ostatnie można również zmierzyć nawet w przypadku poszerzenia niejednorodnego. Jest to zatem optymalna technika do oceny, na przykład, poszerzenia jednorodnego emiterów poszerzonych niejednorodnie. Pozwala to odpowiedzieć na istotne pytania dotyczące tego, co decyduje o obserwowanych charakterystykach spektralnych i ogranicza wydajność emiterów. Wreszcie, wiele schematów przetwarzania informacji kwantowej wykorzystuje techniki rezonansu optycznego jako narzędzie do inicjalizacji, manipulacji i odczytu kubitów.

4.4 Spójność w kropkach kwantowych

4.4.1 Stan wiedzy i wyzwania przed moim wkładem w tę dziedzinę

Pojedyncze fotony stanowią podstawowy element większości technologii optyki kwantowej. Przez lata opracowano wiele metod generowania pojedynczych fotonów. W szczególności emitery półprzewodnikowe mają potencjał skalowalności i integracji z urządzeniami elektronicznymi. Pomimo intensywnych wysiłków zarówno w zakresie badań podstawowych, jak i rozwoju zastosowań, idealne źródło pojedynczych fotonów pozostaje wciąż nieosiągalne. Badano różne platformy — od kropek kwantowych po centra barwne w diamentach — pod kątem ich potencjału do wytwarzania niezawodnych, pojedynczych fotonów na żądanie, ale żadna z nich nie łączyła w jednym systemie wszystkich poświadczonych cech, takich jak wysoka nierozróżnialność fotonów, solidna spójność spinowa i skalowalność. Przez wiele lat **kropki kwantowe półprzewodnikowe** służyły w pionierskich badaniach z optyki kwantowej w ciele stałym. Dla kropek kwantowych osiągnięto m.in. rekordową jasność źródeł jednofotonowych cechy [14, 15]. Ocena kropek kwantowych jako źródeł pojedynczych fotonów zależy od odpowiedzi na istotne pytania dotyczące ich podstawowych właściwości. Jakie czynniki ograniczają ich możliwości

operacyjne? Naukowcy potrzebują metod do badania efektów poszerzenia niejednorodnego oraz do zrozumienia mikroskopowych procesów powodujących dekoherencję.

Pomimo przewag nad parametrycznymi źródłami fotonów czy atomami w pułapkach optycznych, jak dotąd nie ma w ciele stałym ani interfejsu fotonów pojedynczych, ani interfejsu spinowo-fotonowego działającego w reżimie fotonów pojedynczych, który wykazywałby bezpośredni potencjał do powszechnego praktycznego wdrożenia, ponieważ żaden system nie łączy wszystkich koniecznych aspektów. Aby wymienić najbardziej znane przykłady brakujących elementów w obecnie badanych systemach: centra NV w diamencie charakteryzują się słabą rozróżnialnością fotonów w połączeniu z jakąkolwiek wydajną strukturą fotoniczną [16], centra wakacji krzemowych w diamencie wymagają temperatur rzędu milikelwinów, aby uzyskać wystarczający czas koherencji spinowej, a kropki kwantowe nie mają wysoce spójnego spinu i charakteryzują się niejednorodnością w energii emisji fotonów. Dla nowych źródeł, które są testowane, pomiar koherencji jest przydatnym narzędziem optymalizacji pod kątem nierozróżnialności fotonów.

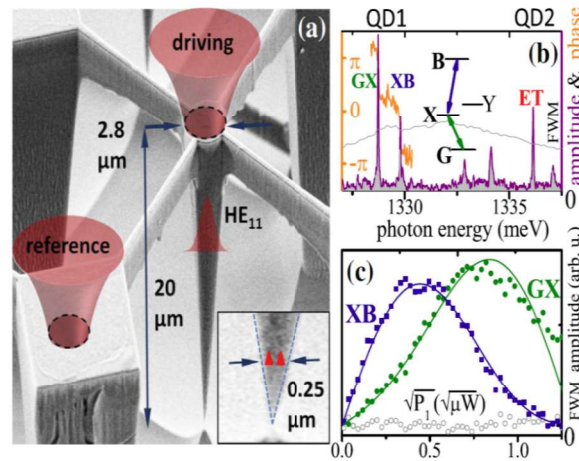
4.4.2 Mój wkład

Chociaż wykrywanie fotoluminescencji z QD od dziesięcioleci jest łatwym zadaniem, obserwacja i ocena jej spójności pozostaje wyzwaniem. Ze względu na mocne odbicie i stosunkowo małą siłę oscylatora generowane nieliniowe sygnały FWM są zazwyczaj poniżej poziomu szumu detektorów. Do wzmocnienia sygnału potrzebne są struktury fotoniczne. Ich zasada działania jest dwojaka. Po pierwsze, wzmacniają one pole elektromagnetyczne lasera w miejscu QD. Po drugie, struktury fotoniczne zwiększają szybkość emisji i poprawiają sprzężenie z pożądanym modem fotonicznym, który jest kierowany do detektora. Wreszcie, struktury fotoniczne mogą pomóc światłu w przenikaniu przez granicę próżnia-dielektryk w obu kierunkach, zmniejszając niepożądane odbicie lasera.

Gigantyczna odpowiedź koherentna pojedynczych kropek kwantowych InAs osadzonych w fonicznych trąbkach W pracy [TJ1] opisujemy "trąbki" foniczne – struktury, które umożliwiły dostęp do spójności kropek kwantowych. Poprzednie generacje zostały opracowane w Grenoble [17, 18]. Podczas mojego pobytu w Grenoble (2014-2017), pod kierunkiem J. Claudona i J.-M. Gérarda z CEA Grenoble, w pomieszczeniach czystych **wyprodukowałem** zawieszoną wersję takich innowacyjnych falowodowych anten fonicznych, jak przedstawiono na rys. 1. Urządzenie to jest zawieszoną strukturą przypominającą igłę, wykonaną z GaAs i zamocowaną do kwadratowych filarów w celu zapewnienia stabilności mechanicznej. W porównaniu z poprzednimi wersjami urządzeń, zawieszenie trąbek powoduje zmniejszenie naprężeń mechanicznych na kropkach kwantowych, które zazwyczaj znajdują się w najcieńszej części drutu i są podatne na naprężenia.

W kolejnych etapach, wspólnie z doktorantem Quentinem Mermillodem, przeprowadziliśmy eksperymenty spektroskopii mieszania czterech fal na kropkach kwantowych osadzonych w fonicznych trąbkach. Dzięki niemal gaussowskiemu profilowi podstawowego modu prowadzonego, gaussowskie wiązki wzbudzające, dopasowane do poprzecznego kształtu tego modu, są prowadzone wzdłuż zwi żającej się sekcji struktury z niewielkimi stratami. Pole wzbudzenia jest zatem adiabatycznie (tzn. bez strat wynikających ze sprzężenia z innymi modami) wzmacniane w miarę zbliżania się do końcówki anteny, gdzie znajdują się kropki kwantowe. W porównaniu z kropką kwantową osadzoną w obj t ściowym materiale GaAs, uzyskuje się 100-krotny wzrost amplitudy wzbudzenia [19], która napędza FWM. Wydajność zbierania generowanego FWM wzrasta z około 1% do 45%. W rezultacie FWM jest odzyskiwane z popraw  stosunku sygnału do tła o około czynnik 4000. Ponadto te nierezonansowe struktury foniczne w naturalny sp s b zapewniają duże pasmo operacyjne przekraczające 100 nm. Wspólne wysi lki eksperymentalne i technologiczne przyniosły zatem bezprecedensowy wgląd w dynamikę i kontrol  spójności optycznej pojedynczych emiterów w ciałach stałych.

Przykładowe widmo FWM ujawnia przejścia ekscytonowo-biekscytonowe ($GX-XB$) i trionowe (ET) w różnych QD. Wzmocnione sprzężenie staje się widoczne po wykreśleniu amplitud FWM GX i XB w zależności od pola impulsu $\theta_1 E_1$; maksymalna wartość FWM jest osiągana dla intensywności E_1 wynoszącej zaledwie $\sim 0,3 \mu W$, czyli o dwa rz dy wielkości mniej niż w przypadku kropek kwantowych osadzonych w materiale obj t ściowym [20]. Oprócz tego znaczącego ulepszenia, szerokie pasmo przenoszenia fonicznych trąbek umożliwia wielokolorową spektroskopię koherentną stanów wzbudzonych i otwiera możliwości pomiaru szybkości defazowania, sprzężeń koherentnych i struktur



Rysunek 1: **Trąbka fotoniczna do wzmacniania FWM pojedynczych ekscytonów w kropkach kwantowych InAs.** (a) Obraz skanningowej mikroskopii elektronowej (SEM) zawieszanej trąbki fotonicznej, wykonanej z GaAs i zawierającej kilka samoorganizujących się kropek kwantowych InAs w pobliżu podstawy (wstawka). (b) Amplituda FWM rozdzielona spektralnie (fioletowy) i faza (pomarańczowy), z widmem lasera pobudzającego pokazanym szarą linią. (c) Amplituda FWM jako funkcja obszaru impulsu $\theta_1 \propto \sqrt{P}$, wskazująca oscylację Rabię przy przejściach ekscytynu (GX, zielone kółka) i bieksytynu (XB, niebieskie kwadraty); przewidywania teoretyczne przedstawiono jako linie ciągłe. Rysunek zaadaptowany z Ref.[TJ1]

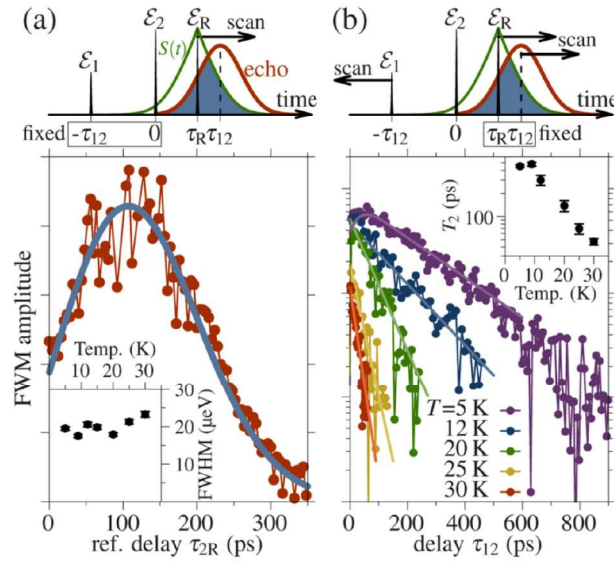
poziomów w całym spektrum kropek kwantowych. Wreszcie, wykorzystując strojenie energii wywołane naprężeniem (jak wykazano w *Nat. Nanotechnol.* 9, 106 (2014)), można doprowadzić do rezonansu oddzielnych przejść ekscytonowych, ułatwiając w ten sposób sprzężenie radiacyjne za pośrednictwem fotonów przewodzonych przez trąbkę.

Wpływ fononów na dekoherencję pojedynczych ekscytonów w deterministycznych mikrosoczewkach z kropkami kwantowymi Chociaż trąbki fotoniczne (omówione wcześniej) oferują znaczne korzyści, ich istotną wadą jest niska wydajność optymalnie funkcjonujących urządzeń, wynikająca z losowego rozmieszczenia QD, które nie są wyrównane z litograficznie proukowanymi trąbkami.

Obiecującą alternatywą jest zastosowanie mikrosoczewek, które można *deterministycznie* zdefiniować za pomocą litografii elektronowej, jak wykazała grupa prof. S. Reitzensteina z TU Berlin [21]. Podobnie jak trąbki fotoniczne, soczewki te umożliwiają skuteczne sprzężenie z polami zewnętrznymi, ale, co najważniejsze, ich umiejscowienie można dopasować do kropek kwantowych z dokładnością wynoszącą około 30 nm. Zapewniają one również szerokie pasmo działania w zakresie około 50 nm szerokości pasma spektralnego.

Jak opisaliśmy w publikacji [TJ2] przy użyciu FWM na pojedynczych ekscytonach w InAs-QD w mikrosoczewkach, rozdzieliliśmy dynamikę populacji i spójności oraz śledziliśmy ich zależność od temperatury. Subpikosekundowy spadek koherencji wynika z ultraszybkiego sprzężenia ekscytynu z fononami (formowania polaronu), które jest również odpowiedzialne za powstanie pasma fononowego w fotoluminescencji. Obliczenia modelu niezależnych bozonów z realistycznymi kształtami QD (przeprowadzone przez Daniela Wiggera i Tilmanna Kuhna z Uniwersytetu w Münster) pozwoliły ilościowo uchwycić wczesny zanik, frakcję linii zero-fononowej (ZPL) oraz kształt linii wynikający ze sprzężenia z fononami. Zostały one zilustrowane na rys. 2. Zaobserwowaliśmy, że przejścia ekscytonowe w tych QD wykazują znaczne odchylenia spektralne, prowadzące do niejednorodnego poszerzenia σ rzędu kilkudziesięciu μeV . Aby właściwie uchwycić ten efekt, konfiguracja FWM została ulepszona poprzez dodanie linii opóźniającej między wiązką impulsów E_2 oraz wiązką referencyjną E_r w eksperymencie FWM. Byłem pierwszym autorem i odpowiadałem za cały przebieg eksperymentu, który został później doceniony przez recenzentów i opublikowany w *ACS Photonics* [TJ2].

Postępy w koherentnej spektroskopii nieliniowej pojedynczych magnetycznych kropek kwantowych Osiągnięcie opisane w publikacji [TJ3] dotyczy spójnej spektroskopii nieliniowej ma-



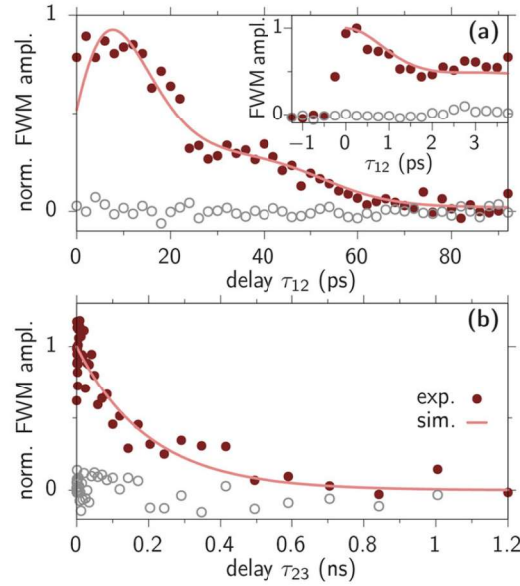
Rysunek 2: **(a)** U góry: Sekwencja dwóch impulsów użyta do pomiaru profilu echa. U dołu: Zintegrowana amplituda FWM w funkcji τ_{2R} w temperaturze 5 K, wykazująca echo Gaussa, którego szerokość czasowa daje niejednorodne poszerzenie σ ; linia ciągła przedstawia dopasowanie teoretyczne. Wstawka: Niejednorodne poszerzenie $\sqrt{8 \ln(2)} \sigma$ uzyskane z szerokości czasowej echa dla różnych temperatur. **(b)** U góry: Sekwencja dwóch impulsów do badania defazowania trionów. Na dole: zmierzona amplituda FWM jako funkcja opóźnienia τ_{12} , ujawniająca dynamikę spójności w różnych temperaturach; linie ciągłe wskazują dopasowania teoretyczne. Wstawka: wydobyty czas defazowania T_2 w funkcji temperatury. Rysunek zaadaptowany z ref. [TJ2].

gnetycznych kropek kwantowych. Po pierwsze, przyczyniłem się do opracowania struktur nanofotonicznych [22] zaprojektowanych specjalnie w celu ułatwienia eksperymentów spektroskopii spójnej. Zastosowanie szerokopasmowych powłok antyrefleksyjnych w połączeniu ze zoptymalizowaną geometrią urządzenia pozwoliło na skuteczne tłumienie rezonansowego tła laserowego i poprawę uzyskiwania sygnału FWM. Czułość eksperymentalna osiągnięta dzięki tej metodzie umożliwiła nam wykrycie słabych koherenetycznych odpowiedzi poszczególnych kropek magnetycznych, co doprowadziło do kompleksowych badań ich spójności. Zaproponowana przez nas metoda projektowania struktur fotonicznych do bezsumowej detekcji nieliniowej stanowi istotny postęp w metodologii, który w opisanych dalej krokach pozwoliła w pionierski sposób kontrolować układy spin-ekscytonowe za pomocą spójnych metod optycznych w platformie półprzewodnikowej.

Zainspirowani wzrostem wydajności osiągniętym dzięki próbie opisanej w poprzedniej pracy [22], wyszliśmy poza dotychczas stosowaną konstrukcję pół-wnęki. Opracowaliśmy w pełni monolityczne wnętrza, wybierając czteroelementowy stop CdZnMgTe jako materiał konstrukcyjny. Po wielu nieudanych próbach z poprzednimi próbkami, postęp ten w końcu pozwolił mi uzyskać wystarczająco wysoki sygnał mieszania czterech fal, aby ujawnić właściwości koherencji kropek kwantowych zawierających jony magnetyczne [TJ3]. W porównaniu z niedomieszkowanymi kropkami CdTe , które wykazują tworzenie echa fotonowego, defazowanie indukowane fononami i bicie koherencji związane ze strukturą subtelną pojedynczego jonu Mn^{2+} wprowadza dyskretną teksturę spinową, która zasadniczo modyfikuje odpowiedź spektralną. Interakcja między ekscytonem a zlokalizowanym spinem rozszczepia linię emisji ekscytonu na sześć oddzielnych linii wynikających z różnych względnych orientacji spinu Mn i ekscytonu. Dyskretny charakter poszerzenia niejednorodnego powoduje dodatkowe efekty defazowania i wzory oscylacji, które wykraczają poza quasi-ciągłe zmiany obserwowane w niedomieszkowanych kropkach.

4.5 Spójność w dichalkogenkach metali przejściowych (TMD)

MoS_2 w postaci objętościowej jest półprzewodnikiem ze skośną przerwą energetyczną, jednak w 2010 roku Tony Heinz i współpracownicy wykazali, że eksfoliacja kryształu do pojedynczej warstwy S–Mo–S odwraca kolejność pasm, podnosząc skośną przerwę energetyczną o $\sim 0,6$ eV i zamieniając monowar-



Rysunek 3: Dynamika FWM ekscytynu QD. (a) Dynamika koherencji jako funkcja opóźnienia τ_{12} wykazująca defazowanie i bicie indukowane FSS. Wstawka pokazuje defazowanie indukowane fononami w skali czasowej kilku ps. (b) Dynamika populacji jako funkcja opóźnienia τ_{23} wykazująca pojedynczy wykładniczy zanik. Rysunek zaadaptowany z Ref.[TJ3]

stwę w jasne źródło fotonów z bezpośrednią przerwą energetyczną [23]. Dwa lata później ta sama grupa wykazała, że światło o prawoskrętnej i lewoskrętnej polaryzacji sprzęga się selektywnie z nierównoważnymi dolinami K^+ i K^- , osiągając prawie 100 % polaryzację optyczną doliny z nanosekundową trwałością [24]. Te dwa wyniki — inżynieria struktury pasmowej kontrolowana warstwowo oraz pseudospin doliny adresowalny optycznie — wzbudziły dzisiejsze zainteresowanie monowarstwami dichalkogenków metali przejściowych (TMD).

Dlaczego pojedyncze warstwy TMD mają znaczenie — W każdym półprzewodnikowym TMD (MX_2 z $M = \text{Mo}, \text{W}$ i $X = \text{S}, \text{Se}$), przejście od pośredniego do bezpośredniego w grubości monowarstwy powoduje powstanie ekscytonów o energii wiązania przekraczającej 0,2 eV [25]. Wynikowa siła oscylatora jest tak duża, że na przykład monowarstwa WS_2 pochłania do 15 % padającego światła i ulega rekombinacji promieniowania w ciągu $\lesssim 1$ ps. Tak silne sprzężenie światła z materią umożliwia efektywne tworzenie polarytonów plazmonów powierzchniowych [26] i selektywne tworzenie polarytonów ekscytonowych [27, 28], wskazując potencjał dla na ultraszybkiej optoelektroniki dolinowej.

4.5.1 Pytania badawcze i stan wiedzy przed moim wkładem w dziedzinę

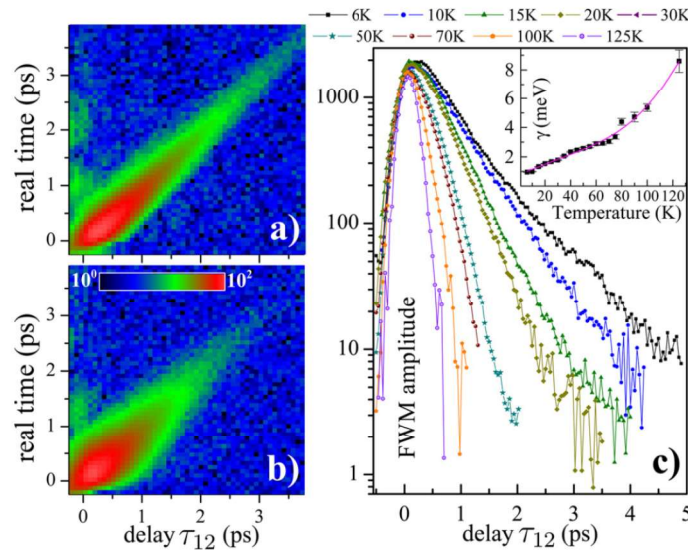
Okolo 2016 r. publikowane czasy koherencji i czasy życia populacji dla ekscytonów TMD nadal różniły się o rzędy wielkości [29]. Szybkości zaniku promienistego i niepromienistego zależą w dużym stopniu od temperatury, naprężenia, środowiska dielektrycznego, szumu ładunku i nieuporządkowania, które razem generują niejednorodną szerokość linii σ (szerokość połowkowa, z ang *full-width half maximum* - FWHM). Nawet najlepsze zrealizowane dotąd emitery pojedynczych fotonów w TMD wykazują zazwyczaj szerokość linii wynoszącą ~ 2 GHz, czyli o rząd wielkości większą niż granica czasu życia wynosząca ~ 200 MHz [30, 31, 32, 33, 34, 35].

4.5.2 Mój wkład

— Jednowarstwowe TMD zawierają silnie związane ekscytyny o dużych momentach dipolowych i ultraszybkim rozpadzie radiacyjnym, co czyni je idealnymi poligonami doświadczalnymi do badania mikroskopowych granic spójności optycznej. Wykorzystując mikroskopię heterodynową z mieszaniem czterech fal (FWM), uzyskaliśmy dostęp zarówno do dynamiki koherencji (T_2), jak i populacji (T_1) ekscytonów neutralnych i naładowanych z rozdzielczością poniżej pikosekundy i selektywnością przestrzenną poniżej mikrona, a wszystko to przy niskiej mocy wzbudzenia laserowego rezonansowego,

zapewniającego minimalne wzbudzenia i wynikające z nich zakłócenia systemu. Aby rozdzielić poszerzenie wynikające z fundamentalnych granic (np. radiacyjne) i to wynikające z niedoskonałości eksperymentalnych (np. szum ładunkowy), wdrożyliśmy mikrospektroskopię FWM na czterech prototypowych monowarstwach — MoSe_2 , WS_2 , MoS_2 i WSe_2 . Główną przeszkodą w uzyskaniu precyzyjnych informacji w eksperymentach naszych poprzedników był duży rozmiar obszarów badanych optycznie (zazwyczaj średnica kilkudziesięciu mikronów), które są wymagane do wdrożenia tradycyjnych metod spektroskopii nieliniowej — takich jak mieszanie czterech fal z rozdzielczością kątową w dużych obszarach płatków TMD. Badanie dużych obszarów powoduje uśrednianie obserwowanych czasów i utrudnia obserwacje. Pokonaliśmy tę trudność, wykorzystując wykrywanie heterodynowe wrażliwe na fazę, które umożliwia badanie obszarów mikroskopowych.

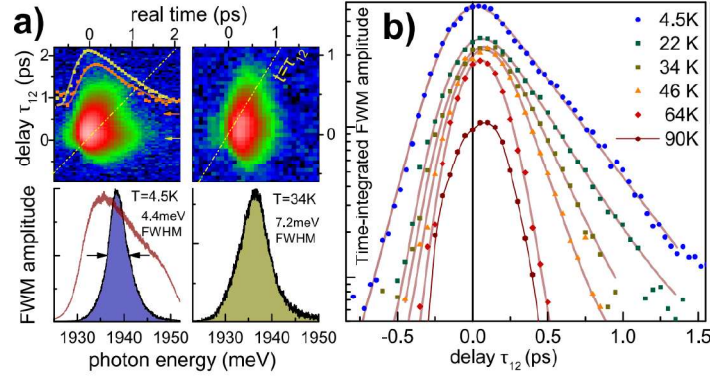
Koherencja ograniczona radiacyjnie w MoSe_2 . Mikrospektroskopia mieszania czterech fal umożliwiła po raz pierwszy obserwacje z wystarczającą precyzją dynamiki populacji ekscytonów w monowarstwach MoSe_2 , odkrywając profil zaniku poniżej pikosekundy [TJ4]. Stanowiło to znaczący przełom metodologiczny, ponieważ wcześniejsze podejścia były ograniczone przez niewystarczającą rozdzielczość czasową. Poprzez mapowanie rozdzielczości czasowej echa fotonowego FWM w eksfoliowanych płatkach MoSe_2 , wykazałem, że czas defazowania ekscytonów zbliża się do granicy radiacyjnej, $T_2 \simeq 2T_1$, w skali czasowej poniżej ps. Odkrycie to zmieniło interpretację granic spójności czasowej w TMD. Echo fotonowe bezpośrednio ujawniło niejednorodne poszerzenie σ nawet w skali poniżej μm , a jego zależność od opóźnienia umożliwiła rozdzielenie wkładu jednorodnego i niejednorodnego do poszerzenia linii emisyjnej. Poszerzenie wywołane fononami zmierzono za pomocą eksperymentów przy zmiennej temperaturze, podczas gdy trójimpulsowe FWM ujawniło konkurencję między szybkimi procesami rekombinacji radiacyjnej w stożku świetlnym a mechanizmami relaksacji stanu ciemnego, które kontrolują pozostałe zachowanie populacji ekscytonów. Wyniki te ustanowiły punkt odniesienia, zgodnie z którym spójna reakcja w obszarach MoSe_2 wysokiej jakości jest z natury ograniczona przez rozpad promieniowania i wrażliwa na lokalny krajobraz nieuporządkowania, co motywuje do stosowania rozdzielczej przestrzennie FWM jako optymalnego narzędzia do badania półprzewodników 2D. [TJ4]



Rysunek 4: Dynamika mieszania czterech fal (FWM) neutralnych ekscytonów w monowarstwie MoSe_2 . (a) Amplituda FWM rozdzielona w czasie w zależności od opóźnienia impulsu τ_{12} , pokazująca tworzenie się echa fotonowego. Wyodrębniony czas rozfazowania T_2 zbliża się do dwukrotności czasu życia populacji T_1 , świadcząc o spójności ograniczonej promieniowaniem. (b) Defazowanie zależne od temperatury ujawnia wpływ poszerzenia indukowanego fononami. Rysunek zaadaptowany z Ref.[TJ4].

Osiągnięcie granicy jednorodności w MoS_2 enkapsulowanym w hBN. Opierając się na tej metodologii, zbadałem MoS_2 enkapsulowany w hBN, w którym środowisko dielektryczne zmniejsza

poszerzenie niejednorodnej linii ekscytonowej. Obrazowanie hiperspektralne FWM ujawniło globalną redukcję σ do kilku meV i pozwoliło zaobserwować obszary o skali mikronowej, w których odpowiedź optyczna osiąga *granice jednorodności*. Korelacja $\{\sigma, \gamma, \mu, T_1\}$ w różnych pozycjach i temperaturach pozwoliła określić ilościowo, w jakim stopniu lokalizacja słabnie wraz ze zmniejszeniem nieuporządkowania. Dynamika gęstości rozdzielona fazowo ujawniła trzy oddzielne kanały wielociałowe, które rozpoczynały się od (i) szybkiego rozpadu radiacyjnego w czasie ps, po którym następowało (ii) redystrybucja stanu ciemnego oraz (iii) opóźniony proces rekombinacji, który odpowiadał mechanizmowi rozpadu trzech ekscytonów w skali czasowej ns. Co najważniejsze, spójne wykrywanie pozwoliło na rozdzielenie rzeczywistych (przesunięcie energii) i urojonych (poszerzenie) części energii własnej ekscytonu poprzez ich fazę, dając mikroskopowy obraz defazowania spowodowanego oddziaływaniem i poszerzenia wywołanego wzbudzeniem w MoS₂. [TJ5]

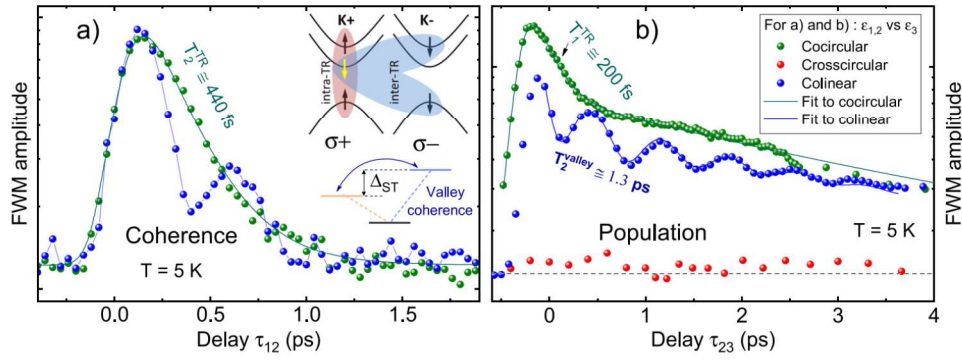


Rysunek 5: Spójność i dynamika gęstości populacji w MoS₂ enkapsulowanej w hBN. (a) Przejściowe FWM zmierzone w obszarach o niskim stopniu nieuporządkowania wykazują swobodny zanik indukcji (FID), co dowodzi, że odpowiedź osiąga granicę jednorodności. (b) Amplituda FWM zintegrowana w czasie jako funkcja τ_{12} zmierzona dla temperatur wskazanych. Czas defazowania T_2 jest mierzony na podstawie wykładniczego zaniku przy $\tau_{12} > 0$, a wraz ze wzrostem temperatury obserwuje się rosnący wpływ defazowania fononowego. W temperaturze 4,5 K (niebieskie kółka) należy zwrócić uwagę na obecność sygnału FWM dla $\tau_{12} < 0$. Rysunek zaadaptowany z ref. [TJ5]

Kontrola koherencji w WS₂ za pomocą oddziaływań środowiskowych. W WS₂ dokonałem kwantyfikacji wpływu *środowiska zewnętrznego* (podłoże/adsorbaty/szum ładunku) na dynamikę neutralnych i naładowanych kompleksów ekscytonowych. Podejście oparte na FWM wykazało związek przyspieszonego defazowania i zaniku populacji z poszerzeniem niejednorodnym. Praca ta uwydatniła, że optymalizacja otoczenia dielektrycznego i chemicznego jest równie ważna jak jakość kryształu dla zbliżenia się do spójności ograniczonej zanikiem promienistym w TMD oraz dla stabilizacji dynamiki trionów/kompleksów istotnej dla urządzeń z regulowanym stanem ładunkowym. [TJ6]

Spójność dolinowa. Oprócz populacji i defazowania, nasze badania zapewniły również bezpośredni dostęp do *spójności dolinowej*, tj. spójności fazowej między ekscytonami znajdującymi się w nierównoważnych dolinach K i K' . W WS₂ FWM ujawniło współlistnienie trionów wewnątrz- i międzydolinowych, które tworzą układ typu V sprzężony poprzez wspólny elektron stanu podstawowego. Ich spójna superpozycja prowadzi do kwantowych dudnień Ramana, z których wyodrębniliśmy czas defazowania spójności doliny $T_2^{\text{valley}} \approx 1,3$ ps — znacznie dłuższy niż wcześniej raportowane wartości. Brak wykrycia sygnału podczas pomiarów przeciwnej polaryzacji kołowej dowodzi, że polaryzacja doliny pozostaje stabilna. Badania wykazują, że FWM stanowi skuteczną metodę badania dynamiki pseudospinu doliny, co otwiera nowe możliwości zastosowań w dolinotronice i optyce kwantowej [TJ6].

4.6 Spójność w centrach defektów atomowych



Rysunek 6: Spójność dolinowa trionów w monowarstwach WS₂ zmierzona przez FWM. (a) Spójność rozdzielona w czasie wykazuje kwantowe bicie Ramana między dwoma stanami trionów. Wyodrębniony czas spójności doliny T_2^{valley} osiąga $\sim 1,3$ ps, czyli jest znacznie dłuższy niż wartości podawane wcześniej, co świadczy o odporności spójności doliny w obszarach o niskim stopniu nieuporządkowania. (b) Dynamika populacji mierzona w polaryzacjach współkołowych i współliniowych E1,2,3. Półprzezroczyste krzywe to dopasowana dynamika. W przypadku ustawienia skrzyżowanych polaryzacji kołowych E1,2 i E3 zmierzona FWM znajduje się na poziomie szumu (szara linia przerywana), co wskazuje na silnie stłumione rozpraszanie między dolinami. Rysunek zaadaptowany z Ref. [TJ6]

4.6.1 Pytania badawcze i stan wiedzy przed moim wkładem w dziedzinę

Pomimo takich osiągnięć, jak rekordowa jasność źródła pojedynczych fotonów [15], wykorzystanie kropek kwantowych w technologiach kwantowych pozostaje ograniczone. Jednym z kluczowych wyzwań dla samoorganizujących się kropek kwantowych InAs (i innych samoorganizujących się kropek kwantowych) było osiągnięcie powtarzalności, ponieważ wzrost wielu identycznych kropek jest trudny. Ze względu na różnice strukturalne między różnymi kropkami kwantowymi i brak wysoce spójnego spinu, kropki kwantowe wydawały się pozostawać w tyle za innymi systemami pod względem praktycznej przydatności do wykorzystania jako bity kwantowe w protokołach obliczeniowych i komunikacyjnych.

Alternatywą są **defekty atomowe** w materiałach o szerokiej przerwie energetycznej, które wykazują potencjał do zastosowań spintronicznych. Badane platformy obejmują defekty atomowe w SiC, centra barwne w diamencie, GaN, hBN, nanorurkach węglowych i innych.

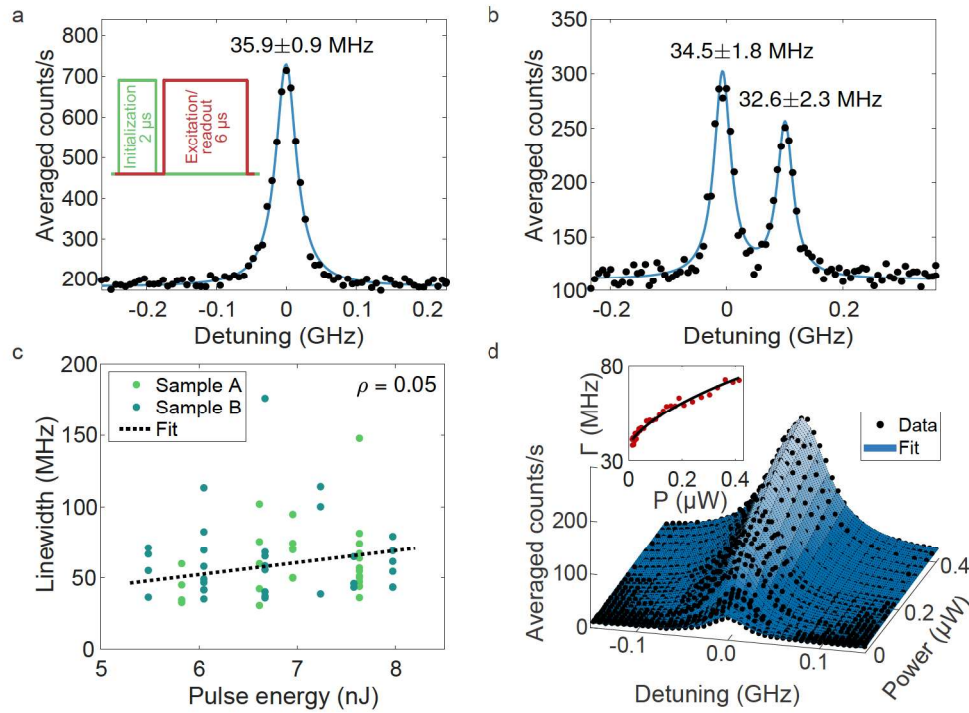
Centra defektów atomowych mają pod pewnymi względami wyjątkowe zalety w porównaniu z innymi emiterami półprzewodnikowymi. Wyraźnym przykładem jest centrum barwne azot-wakansja (NV) w diamencie, charakteryzujące się spinem o bardzo długim czasie koherencji [36]. Stopień swobody spinu elektronu jest sprzężony z przejściami optycznymi, co pozwala na jego optyczną inicjalizację i odczyt. Może on również splatać się z fotonem – powstaje wówczas tak zwany „latający kubit”. Centra NV charakteryzują się stabilną emisją pojedynczych fotonów, również w temperaturze pokojowej. Ze względu na stosunkowo prostą strukturę defektów atomowych, obejmującą zazwyczaj tylko jedną wakansję i atom zanieczyszczenia w sieci krystalicznej, mogą one być w zasadzie bardzo jednolite. Jednak tylko kilka systemów przeszło z fazy demonstracyjnej "proof-of-concept" do bardziej zaawansowanej fazy rozwoju i nadal nie ma „idealnego” emiter pojedynczych fotonów na żądanie [37, 38]. Jego zastosowania obejmują wykrywanie [39, 40] i komunikację kwantową, a postępy wykazano w zakresie splątania spinowego [41] oraz splątania spin-spin na duże odległości [42]. Jednak połączenie wielu centrów NV w celu stworzenia sieci kwantowych na dużą skalę utrudnia niska częstotliwość generowania fotonów nierozróżnialnych z poszczególnych centrów NV [42]. Ponadto efekt dyfuzji spektralnej utrudnia zastosowania, takie jak generowanie splątania, i sprawia, że badania nad spójnością optyczną stają się trudne.

Urządzenia fotoniczne mogą zwiększyć szybkość generowania fotonów nierozróżnialnych. Godnym uwagi przykładem jest integracja membrany diamentowej w otwartej mikrownęce Fabry’ego-Perota, która umożliwia wygodny dostęp optyczny, dopasowanie modów i strojenie rezonansu kawity *in situ* do danego emitera [43, 44, 45, 46, 44]. W tym ustawieniu bryła diamentu zostaje zredukowana do cienkiej membrany o grubości zaledwie kilku mikronów — jest to podejście minimalnie inwazyjne [47, 48, 16, 49]. Metoda ta stanowi obiecujące podejście do zwiększenia szybkości produkcji identycznych fotonów z pojedynczych centrów NV. Jednak nawet taka metoda strukturyzacji diamentu, uważana

za mało inwazyjną, spowodowała pogorszenie jakości optycznej centrum NV i pojawienie się wyraźnej dyfuzji spektralnej [16, 50].

Dyfuzja spektralna wynika z losowych fluktuacji częstotliwości linii zerowej fononowej (ZPL), które wynikają z szumu ładunku w wytworzonym kryształ. Ponieważ centra NV wykazują znaczną zmianę statycznego momentu dipolowego po wzbudzeniu elektronicznym [51], lokalne pole elektryczne ma silny wpływ na częstotliwość emisji ZPL. To pole elektryczne zależy z kolei od rozmieszczenia i zajętości pobliskich pułapek ładunków, w tym defektów i zanieczyszczeń wprowadzonych podczas przetwarzania. W związku z tym bardzo pożądane są metody generowania centrów NV oraz strukturyzacji diamentu, które nie wprowadzają pasywnych niedoskonałości.

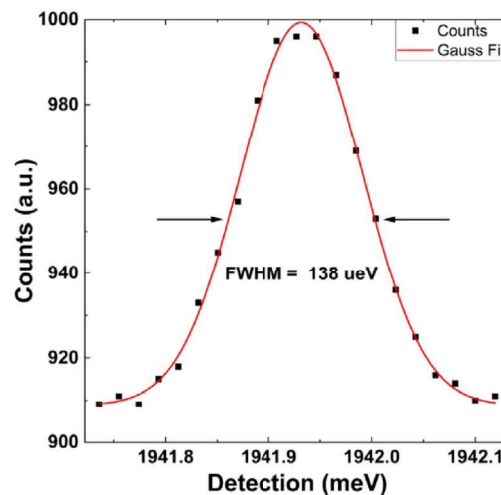
4.6.2 Mój wkład



Rysunek 7: a) Szerokość linii optycznej zmierzona na NV, które wytworzyłem przy użyciu soczewki immersyjnej i lasera femtosekundowego. Zerowe odchylenie odpowiada częstotliwości ZPL wynoszącej 470,494 THz. Wstawka pokazuje sekwencję pomiarową laserów dla pomiaru wzbudzenia fotoluminescencji. (b) Szerokość linii zmierzona na centrum NV w próbce B. Zerowe przesunięcie odpowiada częstotliwości ZPL wynoszącej 470,509 THz. (c) Zależność szerokości linii w dwóch próbkach od energii impulsu lasera fs użytej w procesie zapisu laserowego. Każdy punkt danych odpowiada oddzielnemu centrum NV, z wyjątkiem kilku przypadków, w których zmierzono dwie linie dla jednego centrum NV. Linia przerywana jest dopasowaniem liniowym o współczynniku Pearsona $\rho = 0,05$, wskazującym na niewielką lub żadną korelację między szerokością linii a energią impulsu. (d) Zależność mocy rezonansowej ZPL NV w próbce A, dopasowana zgodnie z równaniem 3. Wstawka pokazuje zależność szerokości linii fwhm od mocy, dopasowaną zgodnie z równaniem 4 i wykazującą wyraźne poszerzenie mocy. Rysunek zaadaptowany z Ref.[TJ7]

Centra NV o niskim poziomie szumu W tym kontekście opracowałem nowatorskie podejście do tworzenia centrów NV przy użyciu zapisu laserowego i soczewki immersyjnej. Protokół tworzenia jest dostosowany do reżimu, w którym wakansje powstają w wyniku przebicia indukowanego tunelowaniem co minimalizuje niezamierzone uszkodzenia sieci krystalicznej. W eksperymencie, które zaprojektowałem, nadzorowałem i wykonywałem, powstałe centra NV wykazywały bardzo wąskie szerokości linii optycznej, których dystrybucja była rozłożona wokół około 70 MHz, co wskazuje na wyjątkowo niskie środowisko szumu ładunku [TJ7]. Takie parametry sprawiają, że centra te są doskonałymi kandydatami do eksperymentów z interferencją dwufotonową, a w szerszym ujęciu – do skalowalnych architektur sieci kwantowych.

Emitery w GaN o zmniejszonym poszerzeniu niejednorodnym Mój zespół badawczy, który stworzyłem na Uniwersytecie Warszawskim, badał emitery pojedynczych fotonów oparte na defektach w materiałach GaN wyhodowanych metodą MOVPE w Instytucie Fizyki Wysokich Ciśnień w Warszawie. W tych próbkach scharakteryzowaliśmy wiele emiterów i znaleźliśmy takie, które charakteryzowały się zmniejszonym rozpraszaniem spektralnym. Badania te prowadziliśmy wzbudzając fotoluminescencję laserem o energii wyższej niż energia emisji emiterów. Szerokość spektralna niektórych linii była ograniczona rozdzielczością spektrometru i wynosiła $138 \mu\text{eV}$, o rząd wielkości mniej niż najlepsze wartości literaturowe. Co ciekawe, zaobserwowaliśmy również gigantyczne dyskretne skoki spektralne do 22 meV , co może wskazywać na duży wbudowany moment dipolowy tych defektów i sugerować możliwość szerokiego zakresu elektrycznego dostrajania ich linii zero- fononowej [TJ8]. Stanowi to znaczący krok naprzód dla emiterów GaN, które mogą służyć jako spójne źródła fotonów z możliwością zewnętrznego strojenia, uzupełniając w ten sposób platformę diamentową NV.



Rysunek 8: Widmo fotoluminescencji emitery w GaN w temperaturze 10 K przy wzbudzeniu 2,137 eV. Czerwona krzywa odpowiada dopasowanej krzywej Gaussa o pełnej szerokości połowy maksymalnej wartości (FWHM) $138 \mu\text{eV}$. Rysunek zaadaptowany z Ref.[TJ8]

Połączenie moich prac nad platformami diamentowymi i GaN prowadzi do znacznego postępu w rozwoju niezawodnych źródeł fotonów pojedynczych o właściwościach koherentnych. Badania wprowadzają nowe strategie zmniejszania dyfuzji spektralnej, umożliwiając jednocześnie rozwój emiterów opartych na defektach do integracji na dużą skalę w kwantowych systemach fonicznych.

4.7 Podsumowanie osiągnięć

Przedstawiona seria publikacji stanowiących osiągnięcie podsumowuje postępy w tworzeniu i badaniu spójności optycznej w emiterach w ciele stałym. Podczas badań doktoranckich w Instytucie Néela, stypendium indywidualnego im. Marii Skłodowskiej-Curie na Uniwersytecie w Bazylei, a później jako adiunkt w Warszawie, moja praca koncentrowała się na badaniu i pokonywaniu ograniczeń emiterów fotonów w różnych urządzeniach półprzewodnikowych. Wielostronne rozpatrzenie tematu pozwoliło mi wyciągnąć następujące ogólne wnioski.

Po pierwsze, kropki kwantowe są dojrzałymi źródłami, które mogą emitować spójne fotony [TJ1]. Badania nad pojedynczymi kropkami kwantowymi ujawniły dokładnie dynamikę i przyczyny defazowania [TJ2], wykazały sprzężenia między poszczególnymi kropkami i po raz pierwszy ujawniły, jak spin wpływa na spójność ekscytonów w systemach kropek kwantowych CdTe domieszkowanych manganem [TJ3].

Moje badania potwierdziły, że materiały warstwowe wydajnie emitują i charakteryzują się wydajnym sprzężeniem ze światłem, co skutkuje ultraszybką emisją o czasie zaniku zaledwie setek femtosekund. W ramach osiągnięć habilitacyjnych po raz pierwszy wykazałem, że spójność ekscytonów w MoSe_2 może być ograniczona przez zanik populacji ekscytonów [TJ4], co stanowi przełom koncepcyjny, który był następnie szeroko cytowany. W dalszych badaniach zbadałem przestrzenny rozkład

spójności i dynamiki populacji w WS_2 oraz zidentyfikowałem obszary w MoS_2 enkapsulowane w hBN, w których poszerzenie ekscytonowe osiąga swoją granicę jednorodności [TJ5, TJ6].

Centra defektów w materiałach o szerokiej przerwie energetycznej są nadal na stosunkowo wczesnym etapie rozwoju, a na ich właściwości duży wpływ ma metoda produkcji. Opracowałem centra NV o niskim poziomie szumów w diamentach poprzez zapis laserowy i soczewkę immersyjną [TJ7]. Zbadałem również emitery pojedynczych fotonów oparte na defektach GaN mające potencjał do zastosowań wymagających strojenia energii emisji oraz integracji w układach fotonicznych (GaN jest bardzo dojrzałą platformą technologiczną pod tym względem). Zaboserwowane emitery o rekordowo niskiej dyfuzji spektralnej [TJ8] dają dobre perspektywy do rozwoju tego kierunku badań, co potwierdza rosnące zainteresowanie tego typu emiterami wśród naukowców na całym świecie (badania rozpoczęto lub kontynuuje się m.in. w Sydney, Singapurze, Nicei, Cardiff oraz wielu ośrodkach naukowych w Stanach Zjednoczonych).

Podsumowując, badania dostarczyły istotnej wiedzy na temat defazowania, nieporządku i mikroskopijnych oddziaływań (elektrostatycznych i fononowych) w trzech głównych układach ciał stałych: kropkach kwantowych, centrach barwnych i materiałach warstwowych.

4.8 Obecny i przyszły plan badań (podsumowanie, horyzont 3–5 lat)

Cel. Opierając się na moim doświadczeniu w zakresie spektroskopii koherentnej, centrów defektów i otwartych mikrownęk, moim celem jest identyfikacja i tłumienie mechanizmów defazowania optycznego w centrach barwnych. Badania spójności optycznej takich emiterów metodami rezonansowymi (takimi jak FWM) są utrudnione przez ich niską siłę oscylatora. To ograniczenie powoduje, że wydajna struktura fotoniczna jest konieczna do badania spójności optycznej wielu z tych emiterów. Nacisk kładziony jest na centra barwne w GaN i hBN oraz centra w jednowarstwowych TMD, osadzone w otwartej mikrownęce, aby umożliwić badania spektroskopii koherentnej i uzyskać nierozróżnialne pojedyncze fotony o wysokiej wydajności.

Podejście i oryginalność. Zamierzam połączyć heterodynową spektroskopię nieliniową (FWM/HSI) w celu precyzyjnego określenia T_2 i T_1 z *otwartą, przestrzajalną mikrownęką Fabry’ego-Perota* charakteryzującą się małą objętością modu i wysokim współczynnikiem jakości, aby wzmocnić sprzężenie światła z materią. Opracuję strategie stabilizacji wnęki (mechaniczne/pasywne, takie jak fotoutwardzanie i blokowanie interferometryczne w duchu Pounda-Drevera-Halla), a następnie trwałego „blokowania” geometrii wnęki po dostrojeniu do wybranego emitera.

Aktualny stan i zasoby. Zespół i infrastruktura są gotowe; konfiguracja wnęki działa w temperaturze pokojowej, a wersja kriogeniczna jest w trakcie wdrażania. Dostępne zasoby obejmują lustra DBR o wysokim współczynniku odbicia (płaskie oraz z wydrążeniem służącym do redukcji objętości modu), dedykowane stanowiska do PL/PLE oraz do skanowania konfokalnego (oparte o platformy softwarowe Qudi/pyLUMS). Prowadzę intensywną współpracę z partnerami krajowymi i zagranicznymi obejmującą wzrost i transfer materiałów TMD/hBN oraz przygotowanie GaN w różnych postaciach.

Powyższy plan badawczy płynnie łączy moje dotychczasowe doświadczenie z obecnymi możliwościami badawczymi, aby odpowiedzieć na ważne pytanie naukowe: jakie są granice spójnego generowania fotonów w stanie stałym?

Czuję się gotowy realizować ten program jako niezależny badacz (*doktor habilitowany*) i z szacunkiem przedkładał Państwu moje dossier do rozpatrzenia przez Komisję.

Zbiór publikacji stanowiących osiągnięcia naukowe

[TJ1] Q Mermillod, Tomasz Jakubczyk, V Delmonte, A Delga, E Peinke, J. M. Gérard, J. Claudon i J. Kasprzak. “Harvesting, Coupling, and Control of Single-Exciton Coherences in Photonic Waveguide Antennas”. *Physical Review Letters* 116.16 (2016), s. 1–6.

- [TJ2] Tomasz Jakubczyk, Valentin Delmonte, Sarah Fischbach, Daniel Wigger, Doris E. Reiter, Quentin Mermillod, Peter Schnauber, Arsenty Kaganskiy, Jan Hindrik Schulze, André Strittmatter, Sven Rodt, Wolfgang Langbein, Tilmann Kuhn, Stephan Reitzenstein i Jacek Kasprzak. “Impact of Phonons on Dephasing of Individual Excitons in Deterministic Quantum Dot Microcavities”. *ACS Photonics* 3.12 (2016), s. 2461–2466.
- [TJ3] Jacek Kasprzak, Daniel Wigger, Thilo Hahn, Tomasz Jakubczyk, Łukasz Zinkiewicz, Paweł Machnikowski, Tilmann Kuhn, Jean François Motte i Wojciech Pacuski. “Coherent Dynamics of a Single Mn-Doped Quantum Dot Revealed by Four-Wave Mixing Spectroscopy”. *ACS Photonics* 9.3 (2022), s. 1033–1041.
- [TJ4] Tomasz Jakubczyk, Valentin Delmonte, Maciej Koperski, Karol Nogajewski, Clément Faugeras, Wolfgang Langbein, Marek Potemski i Jacek Kasprzak. “Radiatively Limited Dephasing and Exciton Dynamics in MoSe₂ Monolayers Revealed with Four-Wave Mixing Microscopy”. *Nano Letters* (2016), acs.nanolett.6b01060.
- [TJ5] Tomasz Jakubczyk, Goutham Nayak, Lorenzo Scarpelli, Wei-Lai Liu, Sudipta Dubey, Nedjma Bendiab, Laëtitia Marty, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Francesco Masia, Gilles Nogues, Johann Coraux, Wolfgang Langbein, Julien Renard, Vincent Bouchiat i Jacek Kasprzak. “Coherence and Density Dynamics of Excitons in a Single-Layer MoS₂/Sub₀ Reaching the Homogeneous Limit”. *ACS Nano* (lut. 2019), acsnano.8b09732.
- [TJ6] Tomasz Jakubczyk, Karol Nogajewski, Maciej R. Molas, Miroslav Bartos, Wolfgang Langbein, Marek Potemski i Jacek Kasprzak. “Impact of Environment on Dynamics of Exciton Complexes in a WS₂ Monolayer”. *2D Materials* 5.3 (2018), s. 1–10.
- [TJ7] Viktoria Yurgens, Josh A. Zuber, Sigurd Flågan, Marta De Luca, Brendan J. Shields, Ilaria Zardo, Patrick Maletinsky, Richard J. Warburton i Tomasz Jakubczyk. “Low-Charge-Noise Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond Created Using Laser Writing with a Solid-Immersion Lens”. *ACS Photonics* 8.6 (czer. 2021), s. 1726–1734.
- [TJ8] Nilesh Dalla, Paweł Kulboka, Michał Kobecki, Jan Misiak, Paweł Prystawko, Henryk Turski, Piotr Kossacki i Tomasz Jakubczyk. “Off-Resonant Photoluminescence Spectroscopy of High-Optical Quality Single Photon Emitters in GaN”. *Solid State Communications* 397 (mar. 2025), s. 115845.

Inne odniesienia

- [1] C. K. Hong, Z. Y. Ou i L. Mandel. “Measurement of Subpicosecond Time Intervals between Two Photons by Interference”. *Physical Review Letters* 59.18 (list. 1987), s. 2044–2046.
- [2] E. Knill, R. Laflamme i G. J. Milburn. “A Scheme for Efficient Quantum Computation with Linear Optics”. *Nature* 409.6816 (sty. 2001), s. 46–52.
- [3] “Event-ready-detectors” *Bell Experiment via Entanglement Swapping* / *Phys. Rev. Lett.* <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.71.4287>.
- [4] Charles H. Bennett, Gilles Brassard, Claude Crépeau, Richard Jozsa, Asher Peres i William K. Wootters. “Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels”. *Physical Review Letters* 70.13 (mar. 1993), s. 1895–1899.
- [5] N. H. Bonadeo, J. Erland, D. Gammon, D. Park, D. S. Katzer i D. G. Steel. “Coherent Optical Control of the Quantum State of a Single Quantum Dot”. *Science* 282.5393 (list. 1998), s. 1473–1476.
- [6] Y. Toda, T. Sugimoto, M. Nishioka i Y. Arakawa. “Near-Field Coherent Excitation Spectroscopy of InGaAs/GaAs Self-Assembled Quantum Dots”. *Applied Physics Letters* 76.26 (czer. 2000), s. 3887–3889.
- [7] A. Zrenner, E. Beham, S. Stuffer, F. Findeis, M. Bichler i G. Abstreiter. “Coherent Properties of a Two-Level System Based on a Quantum-Dot Photodiode”. *Nature* 418.6898 (sierp. 2002), s. 612–614.

- [8] K. Kuroda, T. Kuroda, K. Watanabe, T. Mano, K. Sakoda, G. Kido i N. Koguchi. “Final-State Readout of Exciton Qubits by Observing Resonantly Excited Photoluminescence in Quantum Dots”. *Applied Physics Letters* 90.5 (sty. 2007), s. 051909.
- [9] A. Muller, E. B. Flagg, P. Bianucci, X. Y. Wang, D. G. Deppe, W. Ma, J. Zhang, G. J. Salamo, M. Xiao i C. K. Shih. “Resonance Fluorescence from a Coherently Driven Semiconductor Quantum Dot in a Cavity”. *Physical Review Letters* 99.18 (list. 2007), s. 187402.
- [10] A. Nick Vamivakas, Yong Zhao, Chao-Yang Lu i Mete Atatüre. “Spin-Resolved Quantum-Dot Resonance Fluorescence”. *Nature Physics* 5.3 (mar. 2009), s. 198–202.
- [11] N. A. Kurnit, I. D. Abella i S. R. Hartmann. “Observation of a Photon Echo”. *Physical Review Letters* 13.19 (list. 1964), s. 567–568.
- [12] Wolfgang Langbein i Brian Patton. “Transient Coherent Nonlinear Spectroscopy of Single Quantum Dots.” *Journal of physics. Condensed matter : an Institute of Physics journal* 19.29 (2007), s. 295203.
- [13] L. Lepetit, G. Chériaux i M. Joffre. “Linear Techniques of Phase Measurement by Femtosecond Spectral Interferometry for Applications in Spectroscopy”. *Journal of the Optical Society of America B* 12.12 (1995), s. 2467.
- [14] Daniel Najer, Immo Söllner, Pavel Sekatski, Vincent Dolique, Matthias C. Löbl, Daniel Riedel, Rüdiger Schott, Sebastian Starosielec, Sascha R. Valentin, Andreas D. Wieck, Nicolas Sanguard, Arne Ludwig i Richard J. Warburton. “A Gated Quantum Dot Strongly Coupled to an Optical Microcavity”. *Nature* 575.7784 (2019), s. 622–627.
- [15] Natasha Tomm, Alisa Javadi, Nadia Olympia Antoniadis, Daniel Najer, Matthias Christian Löbl, Alexander Rolf Korsch, Rüdiger Schott, Sascha René Valentin, Andreas Dirk Wieck, Arne Ludwig i Richard John Warburton. “A Bright and Fast Source of Coherent Single Photons”. *Nature Nanotechnology* 16.4 (sty. 2021), s. 399–403.
- [16] Daniel Riedel, Immo Söllner, Brendan J. Shields, Sebastian Starosielec, Patrick Appel, Elke Neu, Patrick Maletinsky i Richard J. Warburton. “Deterministic Enhancement of Coherent Photon Generation from a Nitrogen-Vacancy Center in Ultrapure Diamond”. *Physical Review X* 7.3 (2017), s. 1–6.
- [17] Julien Claudon, Joël Bleuse, Nitin Singh Malik, Maela Bazin, Périne Jaffrennou, Niels Gregersen, Christophe Sauvan, Philippe Lalanne i Jean-Michel Gérard. “A Highly Efficient Single-Photon Source Based on a Quantum Dot in a Photonic Nanowire”. *Nature Photonics* 4.3 (mar. 2010), s. 174–177.
- [18] Julien Claudon, Niels Gregersen, Philippe Lalanne i Jean Michel Gérard. “Harnessing Light with Photonic Nanowires: Fundamentals and Applications to Quantum Optics”. *Chemphyschem : a European journal of chemical physics and physical chemistry* 14.11 (2013), s. 2393–2402.
- [19] Q. Mermillod, D. Wigger, V. Delmonte, D. E. Reiter, C. Schneider, M. Kamp, S. Höfling, W. Langbein, T. Kuhn, G. Nogues i J. Kasprzak. “Dynamics of Excitons in Individual InAs Quantum Dots Revealed in Four-Wave Mixing Spectroscopy”. *Optica* 3.4 (2016), s. 377.
- [20] J. Kasprzak, K. Sivalertporn, F. Albert, C. Schneider, S. Höfling, M. Kamp, A. Forchel, S. Reitzenstein, E. A. Muljarov i W. Langbein. “Coherence Dynamics and Quantum-to-Classical Crossover in an Exciton-Cavity System in the Quantum Strong Coupling Regime”. *New Journal of Physics* 15 (2013).
- [21] M Gschrey, a Thoma, P Schnauber, M Seifried, R Schmidt, B Wohlfeil, L Krüger, J-H Schulze, T Heindel, S Burger, F Schmidt, a Strittmatter, S Rodt i S Reitzenstein. “Highly Indistinguishable Photons from Deterministic Quantum-Dot Microlenses Utilizing Three-Dimensional in Situ Electron-Beam Lithography.” *Nature communications* 6.May (2015), s. 7662.

- [22] W. Pacuski, V. Delmonte, Tomasz Jakubczyk, K. Sobczak, J. Borysiuk, K. Sawicki, E. Janik, J. Kasprzak, J.-G. Rousset, V. Delmonte, Tomasz Jakubczyk, E. Janik, J. Kasprzak, W. Pacuski, J.-G. Rousset, V. Delmonte, Tomasz Jakubczyk, K. Sobczak, J. Borysiuk, K. Sawicki, E. Janik i J. Kasprzak. “Antireflective Photonic Structure for Coherent Nonlinear Spectroscopy of Single Magnetic Quantum Dots”. *Crystal Growth and Design* 17.6 (2017).
- [23] Kin Fai Mak, Changgu Lee, James Hone, Jie Shan i Tony F. Heinz. “Atomically Thin MoS₂: A New Direct-Gap Semiconductor”. *Physical Review Letters* 105.13 (2010), s. 2–5.
- [24] Kin Fai Mak, Keliang He, Jie Shan i Tony F. Heinz. “Control of Valley Polarization in Monolayer MoS₂ by Optical Helicity”. *Nature Nanotechnology* 7.8 (2012), s. 494–498.
- [25] Alexey Chernikov, Timothy C. Berkelbach, Heather M. Hill, Albert Rigosi, Yilei Li, Ozgur Burak Aslan, David R. Reichman, Mark S. Hybertsen i Tony F. Heinz. “Exciton Binding Energy and Nonhydrogenic Rydberg Series in Monolayer WS₂”. *Physical Review Letters* 113.7 (2014), s. 1–5.
- [26] You Zhou, Giovanni Scuri, Dominik S. Wild, Alexander A. High, Alan Dibos, Luis A. Jauregui, Chi Shu, Kristiaan de Greve, Kateryna Pistunova, Andrew Joe, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Philip Kim, Mikhail D. Lukin i Hongkun Park. “Probing Dark Excitons in Atomically Thin Semiconductors via Near-Field Coupling to Surface Plasmon Polaritons”. *Nature Nanotechnology* June (2017), s. 1–6.
- [27] S Dufferwiel, S Schwarz, F Withers, A A P Trichet, F Li, M Sich, O Del Pozo-Zamudio, C Clark, A Nalitov, D D Solnyshkov, G Malpuech, K S Novoselov, J M Smith, M S Skolnick, D N Krizhanovskii i A I Tartakovskii. “Exciton-Polaritons in van Der Waals Heterostructures Embedded in Tunable Microcavities.” *Nature communications* 6.May (2015), s. 8579.
- [28] Nils Lundt, Sebastian Klemmt, Evgeniia Cherotchenko, Simon Betzold, Oliver Iff, Anton V. Nalitov, Martin Klaas, Christof P. Dietrich, Alexey V. Kavokin, Sven Höfling i Christian Schneider. “Room-Temperature Tamm-Plasmon Exciton-Polaritons with a WSe₂ Monolayer”. *Nature Communications* 7 (2016), s. 13328.
- [29] Galan Moody i Xiaodong Xu. “Exciton Dynamics in Monolayer Transition Metal Dichalcogenides”. *arXiv* 1 (2016), s. 25–27.
- [30] Mete Atatüre, Dirk Englund, Nick Vamivakas, Sang-Yun Lee i Joerg Wrachtrup. “Material Platforms for Spin-Based Quantum-Photonic Technologies”. in *Prepara* 3.mAY (2018).
- [31] M Koperski, K Nogajewski, A Arora, V Cherkez, P Mallet, J-Y Veuillen, J Marcus, P Kossacki i M Potemski. “Single Photon Emitters in Exfoliated WSe₂ Structures”. 10.6 (2015), s. 503.
- [32] Ajit Srivastava, Meinrad Sidler, Adrien V. Allain, Dominik S. Lembke, Andras Kis i A. Imamoglu. “Optically Active Quantum Dots in Monolayer WSe₂”. *Nature Nanotechnology* 10.6 (czer. 2015), s. 491–496.
- [33] Yu-Ming He, Genevieve Clark, John R Schaibley, Yu He, Ming-Cheng Chen, Yu-Jia Wei, Xing Ding, Qiang Zhang, Wang Yao, Xiaodong Xu i in. “Single Quantum Emitters in Monolayer Semiconductors”. 10.6 (2015), s. 497.
- [34] Chitrleema Chakraborty, Laura Kinnischtzke, Kenneth M Goodfellow, Ryan Beams i A Nick Vamivakas. “Voltage-Controlled Quantum Light from an Atomically Thin Semiconductor”. 10.6 (2015), s. 507.
- [35] Philipp Tonndorf, Robert Schmidt, Robert Schneider, Johannes Kern, Michele Buscema, Gary A. Steele, Andres Castellanos-Gomez, Herre S. J. van der Zant, Steffen Michaelis de Vasconcellos i Rudolf Bratschkitsch. “Single-Photon Emission from Localized Excitons in an Atomically Thin Semiconductor”. *Optica* 2.4 (kw. 2015), s. 347.
- [36] N. Bar-Gill, L. M. Pham, A. Jarmola, D. Budker i R. L. Walsworth. “Solid-State Electronic Spin Coherence Time Approaching One Second”. *Nature Communications* (2013).
- [37] Igor Aharonovich, Dirk Englund i Milos Toth. “Solid-State Single-Photon Emitters”. *Nature Photonics* 10.10 (paź. 2016), s. 631–641.

- [38] Michael E. Reimer i Catherine Cher. “The Quest for a Perfect Single-Photon Source”. *Nature Photonics* (2019).
- [39] J. R. Maze, P. L. Stanwix, J. S. Hodges, S. Hong, J. M. Taylor, P. Cappellaro, L. Jiang, M. V. Gurudev Dutt, E. Togan, A. S. Zibrov, A. Yacoby, R. L. Walsworth i M. D. Lukin. “Nanoscale Magnetic Sensing with an Individual Electronic Spin in Diamond”. *Nature* 455.7213 (paź. 2008), s. 644–647.
- [40] L Rondin, J-P Tetienne, T Hingant, J-F Roch, P Maletinsky i V Jacques. “Magnetometry with Nitrogen-Vacancy Defects in Diamond”. *Reports on Progress in Physics* 77.5 (maj 2014), s. 056503.
- [41] E. Togan, Y. Chu, A. S. Trifonov, L. Jiang, J. Maze, L. Childress, M. V. G. Dutt, A. S. Sørensen, P. R. Hemmer, A. S. Zibrov i M. D. Lukin. “Quantum Entanglement between an Optical Photon and a Solid-State Spin Qubit”. *Nature* 466.7307 (2010), s. 730–734.
- [42] B. Hensen, H. Bernien, A. E. Dreaú, A. Reiserer, N. Kalb, M. S. Blok, J. Ruitenbergh, R. F.L. Vermeulen, R. N. Schouten, C. Abellán, W. Amaya, V. Pruneri, M. W. Mitchell, M. Markham, D. J. Twitchen, D. Elkouss, S. Wehner, T. H. Taminiau i R. Hanson. “Loophole-Free Bell Inequality Violation Using Electron Spins Separated by 1.3 Kilometres”. *Nature* 526.7575 (2015).
- [43] Russell J Barbour, Paul A Dalgarno, Arran Curran, Kris M Nowak, Howard J Baker, Denis R Hall, Nick G Stoltz, Pierre M Petroff i Richard J Warburton. “A Tunable Microcavity ARTICLES YOU MAY BE INTERESTED In”. 110 (2011), s. 53107.
- [44] Roland Albrecht, Alexander Bommer, Christian Deutsch, Jakob Reichel i Christoph Becher. “Coupling of a Single Nitrogen-Vacancy Center in Diamond to a Fiber-Based Microcavity”. *Physical Review Letters* 110.24 (czer. 2013), s. 243602.
- [45] S. Johnson, P. R. Dolan, T. Grange, A. A P Trichet, G. Hornecker, Y. C. Chen, L. Weng, G. M. Hughes, A. A R Watt, A. Auffèves i J. M. Smith. “Tunable Cavity Coupling of the Zero Phonon Line of a Nitrogen-Vacancy Defect in Diamond”. *New Journal of Physics* 17.12 (2015), s. 122003.
- [46] Hanno Kaupp, Thomas Hümmer, Matthias Mader, Benedikt Schlederer, Julia Benedikter, Philip Haeusser, Huan Cheng Chang, Helmut Fedder, Theodor W. Hänsch i David Hunger. “Purcell-Enhanced Single-Photon Emission from Nitrogen-Vacancy Centers Coupled to a Tunable Microcavity”. *Physical Review Applied* 6.5 (2016), s. 1–10.
- [47] Erika Janitz, Maximilian Ruf, Mark Dimock, Alexandre Bourassa, Jack Sankey i Lilian Childress. “Fabry-Perot Microcavity for Diamond-Based Photonics”. *PHYSICAL REVIEW A* 92 (2015), s. 43844.
- [48] Stefan Bogdanović, Suzanne B. van Dam, Cristian Bonato, Lisanne C. Coenen, Anne-Marije J. Marije J. Zwerver, Bas Hensen, Madelaine S.Z. Z. Liddy, Thomas Fink, Andreas Reiserer, Marko Lončar i Ronald Hanson. “Design and Low-Temperature Characterization of a Tunable Microcavity for Diamond-Based Quantum Networks”. *Applied Physics Letters* 110.17 (kw. 2017), s. 1–5.
- [49] Daniel Riedel, Sigurd Flågan, Patrick Maletinsky i Richard J. Warburton. “Cavity-Enhanced Raman Scattering for in Situ Alignment and Characterization of Solid-State Microcavities”. *Physical Review Applied* 13.1 (2020), s. 1.
- [50] Maximilian Ruf, Mark Ijspeert, Suzanne Van Dam, Nick De Jong, Hans Van Den Berg, Guus Evers, Ronald Hanson, Suzanne Van Dam, Nick De Jong, Hans Van Den Berg, Guus Evers i Ronald Hanson. “Optically Coherent Nitrogen-Vacancy Centers in Micrometer-Thin Etched Diamond Membranes”. *Nano Letters* 19.6 (2019), s. 3987–3992.
- [51] J. R. Maze, A. Gali, E. Togan, Y. Chu, A. Trifonov, E. Kaxiras i M. D. Lukin. “Properties of Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond: The Group Theoretic Approach”. *New Journal of Physics* 13 (2011), s. 1–30.
- [52] Paweł MacHnikowski. “Change of Decoherence Scenario and Appearance of Localization Due to Reservoir Anharmonicity”. *Physical Review Letters* 96.14 (kw. 2006), s. 140405.

- [53] E A Muljarov i R Zimmermann. “Dephasing in Quantum Dots : Quadratic Coupling to Acoustic Phonons”. 237401.December (2004), s. 1–4.

4.9 Dodatek

4.9.1 Spójność w układzie dwupoziomowym — definicje terminów użytych w niniejszej pracy habilitacyjnej

Opisując pojedynczy, izolowany system kwantowy dwupoziomowy, jego stan kwantowy można zapisać jako spójną superpozycję stanu podstawowego $|0\rangle$ i stanu wzbudzonego $|1\rangle$ (odpowiadającego na przykład braku lub obecności ekscytonu w QD):

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle, \quad (1)$$

gdzie c_0 i c_1 są zespolonymi amplitudami prawdopodobieństwa spełniającymi warunek $|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$.

W wielu eksperymentach ma się do czynienia albo z zespołem nominalnie identycznych emiterów, albo z pojedynczym emiterem podlegającym fluktuacjom stochastycznym (np. dryfowi spektralnemu), tak że mierzone wielkości obserwowalne odpowiadają średniej z wielu realizacji („zespół czasowy”). Formalizm macierzy gęstości zapewnia wygodny i ogólny opis obu sytuacji.

W bazie $\{|1\rangle, |0\rangle\}$, macierz gęstości jest następująca

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{10} \\ \rho_{01} & \rho_{00} \end{pmatrix}, \quad \rho_{ij} = \langle i|\rho|j\rangle. \quad (2)$$

Populacje stanów wzbudzonych i podstawowych są podane przez elementy diagonalne ρ_{11} i ρ_{00} , odpowiednio. Dla stanu czystego $|\psi\rangle$ mamy

$$\rho = |\psi\rangle\langle\psi| = \begin{pmatrix} |c_1|^2 & c_1 c_0^* \\ c_0 c_1^* & |c_0|^2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

tak więc

$$\rho_{11} = |c_1|^2, \quad \rho_{00} = |c_0|^2 = 1 - |c_1|^2. \quad (4)$$

Spójność między stanami podstawowymi i wzbudzonymi jest kwantyfikowana przez elementy macierzy gęstości poza przekątną ρ_{01} i $\rho_{10} = \rho_{01}^*$. Dla stanu czystego,

$$\rho_{01} = c_0 c_1^*, \quad \rho_{10} = c_1 c_0^* = \rho_{01}^*. \quad (5)$$

Wyrażenia te kodują relację fazową między $|0\rangle$ a $|1\rangle$ i określają polaryzację optyczną związaną z przejściem. Elementy poza przekątną będą oscylować z częstotliwością odpowiadającą różnicy energii między tymi stanami własnymi¹.

Defazowanie i stany mieszane. W rzeczywistych układach ciała stałego oddziaływania z otoczeniem prowadzą do zaniku spójności. Szum środowiskowy może oddziaływać na oba poziomy w podobny lub różny sposób. Przykłady środowisk zdolnych do wywoływania takich interakcji obejmują pola elektromagnetyczne (np. środowisko o zmiennym ładunku) i kąpiele termiczne (np. fonony). W przypadku czystego defazowania populacje pozostają niezmienione, podczas gdy elementy poza przekątną zanikają w czasie:

$$\rho_{01}(t) = \rho_{01}(0) e^{-t/T_2}, \quad \rho_{10}(t) = \rho_{10}(0) e^{-t/T_2}. \quad (6)$$

Natomiast relaksacja populacji zachodzi w skali czasowej T_1 i zmienia ρ_{11} oraz ρ_{00} . Często wygodnie jest rozdzielić zanik spójności na zanik populacji i czyste defazowanie,

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{2T_1} + \frac{1}{T_\phi}, \quad (7)$$

¹W ujęciu Schrödingera – sformułowaniu mechaniki kwantowej, w którym wektory stanu ewoluują w czasie.

gdzie T_ϕ oznacza czas czystego defazowania². W przypadku braku czystego defazowania, $T_2 = 2T_1$. Równanie to można intuicyjnie zrozumieć, argumentując, że populacja jest prawdopodobieństwem (amplitudą do kwadratu), podczas gdy spójność wiąże się z amplitudą.

Czyste rozfazowanie wynika z elastycznego rozpraszania ekscyton-ekscyton i ekscyton-fonon, które są obydwa drugiego rzędu w operatorach fononowych, prawdopodobnie pochodzących z anharmoniczności fononów [52] lub wirtualnych przejść do wyższych stanów ekscytonowych [53].

Kiedy układ podlega fluktuacjom stochastycznym, a pomiary skutecznie uśredniają wiele realizacji, stan opisuje *mieszana* macierz gęstości $\rho = \langle |\psi\rangle\langle\psi| \rangle$, gdzie $\langle \cdot \rangle$ oznacza średnią zespoloną (lub czasową). W tym przypadku ρ_{11} i ρ_{00} pozostają uśrednionymi populacjami, podczas gdy ρ_{01} odzwierciedla uśrednioną spójność, która może być tłumiona przez defazowanie, nawet jeśli populacje pozostają niezmiennione.

Wreszcie, obserwowalną wielkością powiązaną z koherencją jest *polaryzacja elektryczna*, proporcjonalna do terminu poza przekątną (koherencji) w macierzy gęstości:

$$\text{Polaryzacja elektryczna: } P \propto \mu \cdot \langle c_0^* c_1 \rangle,$$

gdzie μ jest momentem dipolowym układu.

Drugim istotnym parametrem są zanikające efekty statyczne, które wpływają na nierozróżnialność fotonów w dłuższych okresach czasu lub w przypadku wielu ekscytonów, ponieważ ich zachowanie różni się od zachowania pojedynczych ekscytonów. Potencjały lokalne wynikające z defektów, zanieczyszczeń i zmiennych ładunków powodują przesunięcie energii ekscytonów i prowadzą do niejednorodnego rozkładu częstotliwości ekscytonów ω_0 . Na przykład makroskopowy zespół charakteryzuje się rozkładem prawdopodobieństwa energii przejścia, co skutkuje **niejednorodnym poszerzeniem** σ .

4.9.2 Technika mieszania czterech fal do oceny spójności

Stopień spójności można zmierzyć poprzez analizę przestrzennych i czasowych powiązań fazowych między polami fizycznymi generowanymi przez system a polami odniesienia (laser w naszym eksperymencie FWM). Rzeczywisty eksperymentalny wzór interferencyjny towarzyszy znacznie silniejszemu rezonansowemu tłu laserowemu. Technika interferometrii spektralnej heterodynowej (HSI) i uznane metody spektroskopii nieliniowej koherentnej służą jako narzędzia eksperymentalne do uzyskania dostępu do tych informacji [12]. Schemat detekcji heterodynowej pozwala na filtrowanie wybranego sygnału nieliniowego o wybranej częstotliwości z tła o innych częstotliwościach i emisji niespójnej (szumu). Aby uzyskać odpowiedź spektralną zarówno w amplitudzie, jak i fazie, stosuje się interferometrię spektralną [13]. Sygnał można odzyskać zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości.

Polaryzacja mieszania czterofalowego (FWM) to polaryzacja trzeciego rzędu dana przez $\chi^3 \epsilon_1^* \epsilon_2 \epsilon_3$, wynikająca z napędzania przejścia trzema polami $\mathcal{E}_{1,2,3}$, o częstotliwościach środkowych $\omega_{1,2,3}$ i gdzie χ^3 jest podatnością elektryczną trzeciego rzędu. Znak * oznacza sprzężenie zespolone, wskazując, że składowa częstotliwości odpowiedniego pola będzie miała znak minus w stosunku do pożądanego częstotliwości wykrywania (zazwyczaj $\omega_2 + \omega_3 - \omega_1$).

Technika HSI umożliwia badaczom pomiar zarówno stanów polaryzacji FWM, jak i ich ewolucji czasowej z poszczególnych emiterów. System osiąga dowolny pożądaný stan superpozycji spójnej na sferze Blocha poprzez regulację obszaru impulsów.

Dalsze aspekty tej techniki:

- **Sekwencja impulsów i detekcja heterodynowa:**

Proces ten wymaga ultraszybkich impulsów laserowych jako standardowego wejścia. Próbkę jest wzbudzana za pomocą trzech lub dwóch wiązek, które działają pod kontrolą fazową. Sygnał FWM z próbki poddawany jest mieszaniu heterodynowemu z wiązką lokalnego oscylatora, aby umożliwić wykrywanie wrażliwe na fazę. Interferometryczne połączenie sygnałów FWM z wiązkami lokalnego oscylatora umożliwia uzyskanie zarówno danych dotyczących amplitudy, jak i fazy z wygenerowanej spójnej polaryzacji.

²Należy zauważyć, że czyste rozfazowanie jest czasami oznaczane jako T_2^* zamiast T_ϕ . Może to prowadzić do nieporozumień, ponieważ szczególnie w NMR T_2^* oznacza *pozorny czas relaksacji poprzecznej, odzwierciedlający straty wynikające z prawdziwego rozfazowania i z niejednorodności w lokalnej częstotliwości Larmora (niejednorodność pola, podatność, dyspersja przesunięcia chemicznego, gradienty itp.)*.

Nieliniowy proces optyczny mieszania czterech fal umożliwia interakcję trzech pól wejściowych w ośrodku, co powoduje powstanie czwartego pola o innej częstotliwości, znanego jako sygnał FWM. Spójny sygnał z emiterów półprzewodnikowych, takich jak kropki kwantowe i studnie kwantowe, zawiera informacje o mikroskopowym stanie polaryzacji ich przejścia ekscytonowego.

- **Zalety interferometrii spektralnej:**

- *Pełna złożona odpowiedź:* Sygnał heterodynowy rejestruje złożone pole elektryczne (wielkość i faza), dzięki czemu można bezpośrednio wyodrębnić dynamikę czasową spójności ekscytonowej.
- *Rozdzielczość poniżej pikosekundy:* Zastosowanie ultraszybkich impulsów pozwala na pomiary w funkcji czasu szybkich kanałów defazowania (np. rozpraszania fononów).
- *Selektywne adresowanie przejść:* Poprzez dostrojenie częstotliwości lasera można ukierunkować się na konkretne przejścia ekscytonowe lub związane z defektami, izolując ich spójną dynamikę od sygnałów tła.

- **Rozwój historyczny:**

Wczesne badania mieszania czterech fal w latach 70. skupiały się na cieczach i półprzewodnikach objętościowych. Wraz z udoskonaleniem technologii ultrakrótkich impulsów laserowych w latach 80. –1990, uwaga skupiła się na studniach kwantowych i superkratach, ujawniając spójną dynamikę ekscytonów. W latach 2000 wykrywanie heterodynowe z interferometrią spektralną stało się de facto standardem w badaniach kropek kwantowych i innych pojedynczych emiterów, umożliwiając precyzyjne mapowanie ultraszybkich procesów defazowania.

5 Informacje dotyczące wykazania znaczącej działalności naukowej lub artystycznej prowadzonej w więcej niż jednej uczelni, instytucji badawczej lub instytucji kulturalnej, w szczególności za granicą.

Od uzyskania tytułu doktora w 2014 r. (z wyróżnieniem) prowadzę ciągłą, znaczącą działalność badawczą w wielu ośrodkach, w tym w trzech instytucjach zagranicznych:

- **Badacz podoktorancki (ERC Starting Grant), Institut Néel, CNRS i CEA, Grenoble, Francja, 2014–2017** — Opracowałem nieliniową spektroskopię koherentną (mieszanie czterech fal, FWM) pojedynczych emiterów oraz wytworzyłem/scharakteryzowałem struktury fotoniczne; jestem współautorem kluczowych wyników badań dotyczących dekoherencji w jednowarstwowych TMD i kropkach kwantowych. Wyniki tych prac zostały opublikowane w czasopismach indeksowanych przez JCR (np. *Nano Letters*, *ACS Photonics*).
- Stypendium indywidualne MSCA, Uniwersytet w Bazylei, Szwajcaria, 2017–2020 — Kierował badaniami nad centrami barwnymi NV w diamentach i otwartymi mikrownkami Fabry’ego-Perota; zademonstrowałem centra NV, utworzone przy użyciu zapisu laserowego, o rekordowo niskim poziomie szumu ładunku (wąskie linie optyczne), co zostało opublikowane w czasopiśmie *ACS Photonics*; byłem współautorem artykułów na temat mikrownek; Prowadziłem zajęcia (fizyka statystyczna, optyka kwantowa) i otrzymałem nagrodę dydaktyczną „Golden correction pen” za zajęcia z optyki kwantowej (wynik ankiety studenckiej) od Uniwersytetu w Bazylei.
- **Studia doktoranckie w ramach programu *cotutelle*, Uniwersytet w Bremie, Niemcy, 2011–2014** — Współopiekun: prof. D. Hommel; tytuł doktora uzyskany z wyróżnieniem *summa cum laude*. Praca obejmowała badania i mikrostrukturyzację struktur półprzewodnikowych II–VI, prowadzone częściowo w Bremie; wyniki obejmowały nowe mikrostruktury fotoniczne i współpracę międzynarodową (w tym z Lipskiem).

Od uzyskania tytułu doktora w 2014 r. rozwinąłem szeroką sieć współpracy krajowej i międzyna-

rodowej (Bazylea: R. Warburton / P. Maletinsky; Grenoble: J. Kasprzak; Majulab Singapur/CNRS Francja: J. Zuniga-Perez, Unipress Warszawa: H. Turski), o czym świadczą wspólne publikacje JCR, a także artykuły, wykłady na zaproszenie, referaty i seminaria (Izrael, Chiny, USA, Francja, Wietnam, Szwajcaria).

Podsumowując, moja działalność badawcza była ciągła i znacząca w więcej niż jednej instytucji, zwłaszcza za granicą, obejmowała długoterminowe pobyty badawcze (Grenoble, Bazylea), *cotutelle* (Bremia), nauczanie na zagranicznej uczelni (Bazylea), udział w międzynarodowych konsorcjach badawczych (Horizons Europe Pathfinder QUONDENSATE) oraz publikacje napisane wspólnie z zagranicznymi partnerami (np. *Nano Letters*, *ACS Photonics*, *NPJ Quantum Information*, *Journal of Applied Physics*).

6 Informacje na temat osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych oraz w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki.

Osiągnięcia dydaktyczne

- **Uniwersytet w Bazylei (2017–2020):** Prowadzenie ćwiczeń z *fizyki statystycznej i optyki kwantowej: stany kwantowe światła*; otrzymanie **nagrody dydaktycznej** za te ostatnie.
- **Uniwersytet Warszawski:** Prowadzenie zajęć pokazowych z *podstaw fizyki II R* (2010–2011) i *fizyki wyrównawczej* (2010); obecnie prowadzi zajęcia z zakresu *Laboratorium fizycznego i elektronicznego* (2023) oraz *Podstaw elektromagnetyzmu* (indywidualny program studiów, 2024).
- **Opieka nad studentami:** Byłem opiekunem wielu studentów studiów licencjackich/magisterskich oraz projektów specjalistycznych laboratoriów; współopiekunem pięciu doktorantów (Q. Mermillod, V. Delmonte, S. Flagan, V. Yurgens, N. Dalla), z których kilkoro kontynuuje karierę naukową.

Osiągnięcia organizacyjne

- **Międzynarodowa Szkoła w Jaszowcu (2022–2024):** Sekretarz sesji szkolnej i członek komitetu organizacyjnego/programowego *Międzynarodowej Szkoły i Konferencji w Jaszowcu poświęconej fizyce półprzewodników*. Stworzyłem program i wprowadził znaczące zmiany w formacie (test wiedzy (quiz) i warsztaty utrwalające wiedzę); anonimowe ankiety przeprowadzone wśród uczestników wykazały bardzo wysoki poziom zadowolenia z doboru prelegentów, nowej formuły i ogólnej organizacji. Obowiązki obejmowały recenzowanie abstraktów, kształtowanie programu naukowego, proponowanie i koordynowanie przewodniczących sesji oraz kontaktowanie się z zaproszonymi prelegentami
- **Członek komitetu programowego, OECS19 — Optyka ekscytonów w układach ograniczonych** (Warszawa, Centrum Nauki Kopernik, 14–19 lipca 2025 r.; jednostka organizacyjna: IFD): Członek komitetu programowego dużego międzynarodowego spotkania (ok. 250 uczestników; ok. 50 wykładów, w tym ok. 40 z zagranicznych instytucji).
- **Rozwój czystego pomieszczenia Nanotech FUW (nanotech.fuw.edu.pl, budynek CeNT na UW):** Współkierowanie działaniem i rozwojem zakładu nano/mikroprodukcji półprzewodników; współuzyskanie **ministerialnej dotacji SPUB** (o wartości > 2,5 mln PLN) na utrzymanie.
- **Kierowanie badaniami i finansowanie:** Kierownik w projektach NCN *SONATA* (platforma fotoniczna dla nowych emiterów kwantowych) i *NAWA Returns*; poprzednie role obejmowały stypendium indywidualne MSCA i udział w grantach ERC Starting Grant; wcześniej główny badacz w projekcie NCN *PRELUDIUM*.
- **Założyciel i lider niezależnego zespołu badawczego (od 2020 r. do chwili obecnej):** Utworzył i utrzymuje grupę składającą się z kilkorga studentów (stałe ponad 4 osoby) i doktoranta, zajmującą się opracowywaniem unikalnych eksperymentów dotyczących interakcji światła z materią z wykorzystaniem nowatorskich emiterów w otwartych, prze-

strajalnych mikrownękach. Pod moim kierownictwem zespół opracował, zaprojektował i zbudował dwie platformy eksperymentalne: (i) konfokalny system skanujący w temperaturze pokojowej do charakteryzowania emiterów pojedynczych fotonów oraz (ii) niestandardowy, otwarty, przestrzalny system mikrokawity Fabry’ego-Perota o ulepszonej stabilności spektralnej. Obowiązki obejmowały rekrutację i mentoring, planowanie projektów i budżetowanie, projektowanie optomechaniczne oraz opracowywanie wszystkich procedur niezbędnych do obsługi ultra stabilnej, strojoną otwartą mikrownęki, w tym demonstrację kamienia milowego: współczynnika Q mikrownęki osiągającego 100000. Zespół ma obecnie na swoim koncie pierwszą publikację ([TJ8]) i pracuje nad kolejnymi.

Popularyzacja i rozpowszechnianie nauki

- **Letnia Szkoła Fizyki, 25 czerwca 2025 r.:** Wykład inauguracyjny *Pojedynczy foton — wielka sprawa* (*Single Photon — a Big Deal*). Wykład otwarty dla publiczności, wprowadzający do tematyki światła kwantowego i jego zastosowań.
- **Dni Otwarte Kampusu Ochota (DOKO), 20 marca 2024 r. & 20 marca 2025 r.:** Praktyczne warsztaty *Źródła pojedynczych fotonów od kuchni* (*Single-Photon Sources: Behind the Scenes*). —interaktywne pokazy dla uczniów szkół średnich i ogółu społeczeństwa.
- Wygłoszono **>10 zaproszonych wykładów i seminariów** oraz **>20 referatów ustnych** na międzynarodowych konferencjach (np. Austin 2014; Jerozolima 2015; Pekin 2016; Ha Long 2017), przyczyniając się do rozpowszechniania wyników badań w środowiskach zajmujących się półprzewodnikami i optyką kwantową.
- Utrzymywanie aktywnych sieci współpracy i współautorstwa obejmujących wiele instytucji, zwiększanie widoczności wyników badań poprzez wspólne publikacje i prezentacje konferencyjne.

7 Inne informacje uważane za istotne dla mojej kariery zawodowej

Wybrane nagrody i wyróżnienia

- **2020** – Nagroda dydaktyczna, Uniwersytet w Bazylei
- **2017–2020** – Stypendium Individual Fellowship Marie Skłodowska–Curie Actions
- **2015** – Nagroda Prezesa Rady Ministrów za wyróżniającą rozprawę doktorską
- **2013** – Stypendium Ministra dla studentów i doktorantów za wybitne osiągnięcia naukowe

Służba społeczności naukowej

- **Zewnętrzny recenzent wniosków, Agence Nationale de la Recherche (ANR), Francja:** Panele Generic Call w latach **2019** i **2020**.
- **Członek komisji rekrutacyjnej doktorantów, program Generation Quantum (Gen-Q, UE):** 30 sierpnia 2025 r. – 25 października 2025 r.

Działalność na rzecz społeczności lokalnej

Oprócz wyżej wymienionych działań naukowych, aktywnie działam na rzecz społeczności lokalnej, szczególnie w zakresie bezpieczeństwa miejskiego, dostępności i jakości życia. Jednym z głównych przykładów jest organizowanie i kierowanie ruchem obywatelskim (www.przejscieolszynki.pl) mającym na celu rozwiązanie problemu niebezpiecznego przejazdu kolejowego, który wcześniej był przyczyną powtarzających się wypadków. Koordynowałem działania mieszkańców i interesariuszy z kolei i dzielnicy. Efektem tych wysiłków była budowa chronionego, sygnalizowanego przejazdu, poprawiającego bezpieczeństwo pieszych w tej okolicy [rok ukończenia: 2024].