



Wrocław 01.12.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Aleksandra Rodka zatytułowanej „Badania dynamiki ekscytonów w dwuwymiarowym półprzewodniku z gazem nośników”

Rozprawa doktorska zatytułowana „*Badania dynamiki ekscytonów w dwuwymiarowym półprzewodniku z gazem nośników*” autorstwa **Pana mgr. Aleksandra Rodka** to synteza badań nad dynamiką ekscytonów neutralnych i naładowanych w elektrycznie bramkowanym układzie półprzewodnika warstwowego z rodziny dichalkogenków metali przejściowych MoSe_2 z modulowaną koncentracją swobodnych nośników (elektronów).

Rozprawa jest napisana w formie skondensowanej zamknięta na 134 stronach formatu A4, składa się z 7 rozdziałów uzupełnionych dodatkami, spisem wieloautorskich artykułów naukowych, które weszły jako materiał do recenzowanej pracy i w których autor pełnił kluczową rolę, oraz innych z udziałem autora. Dodatkowo można tu znaleźć spis ustnych wystąpień konferencyjnych Pana Aleksandra Rodka oraz bibliografią. Na końcu każdego rozdziału z wynikami badań znajduje się synteza osiągnięć, które autor dysertacji uznał za najbardziej wartościowe, wraz z podsumowaniem całościowym wszystkich najważniejszych osiągnięć znajdującym się w rozdziale 7.

Pracę czyta się bardzo dobrze, jest napisana językiem zrozumiałym i otwartym, z małą ilością hermetycznych wyrażeń i pojęć, aczkolwiek, zrozumienie pracy wymaga wiedzy z zakresu teorii ciała stałego oraz zaawansowanych technik eksperymentalnych. Praca przeprowadza czytelnika przez złożone procesy dynamiczne kompleksów ekscytonowych wzbudzanych optycznie, które zachodzą w pojedynczej warstwie krystalicznej półprzewodnika MoSe_2 zamkniętego pomiędzy warstwowymi kryształami izolatora heksagonalnego azotku boru (ang. hexagonal Boron Nitride- hBN). Dodatkowo, warstwa MoSe_2 jest bramkowana elektrycznie, co umożliwia kontrolę nośników większościowych, głównie elektronów w kryształ. Praca ma charakter doświadczalny i wymagała zastosowania zaawansowanych metod ultraszybkiej spektroskopii optycznej, w tym: (i) techniki pompa-sonda z dodatkowo wysoką rozdzielczością przestrzenną i spektralną, (ii) techniki rozdzielczej w czasie fotoluminescencji z użyciem kamery smugowej, (iii) techniki heterodynowej interferometrii spektralnej mieszania czterech fal (ang. Four Wave Mixing – FWM), uzupełnionych standardowymi technikami spektroskopowymi jak fotoluminescencja, odbicie światła oraz magneto-fotoluminescencja.

Podjęte w toku realizacji pracy problemy badawcze należą do jednego z głównych nurtów badań obecnych w światowej fizyce i są zdecydowanie na czasie. Rezultaty pracy dają istotną wiedzę w rozumienie procesów dynamiki wzbudzenia w kryształach pojedynczo-warstwowym MoSe_2 w obecności



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

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

Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
<http://wppt.pwr.edu.pl>

REGON: 00001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



swobodnych nośników. W mojej ocenie, do najważniejszych wyników pracy należą:

1. Wyznaczenie skal czasowych procesów dynamicznych związanych z ekscytonem neutralnym z eksperymentu pompa-sonda w sprzężeniu z modelem pola lokalnego dla układu hBN/MoSe₂/hBN bez bramkowania elektrycznego w temperaturach kriogenicznych: czasu życia (~1 ps), rozpraszania międzypolinowego (~0.1 ps), oraz koherencji (~0.3 ps);
2. Wyznaczenie skali czasowej relaksacji ekscytonu naładowanego dla układu MoSe₂/SiO₂/Si (~30 ps) w temperaturach kriogenicznych;
3. Wyznaczenie siły oddziaływania ekscyton-ekscyton w populacji ekscytonów neutralnych dla układu hBN/MoSe₂/hBN w temperaturach kriogenicznych;
4. Wyznaczenie skali czasowej rozpraszania międzypolinowego oraz czasu życia w funkcji koncentracji elektronów swobodnych dla ekscytonu naładowanego w eksperymencie pompa-sonda dla bramkowanego układu hBN/MoSe₂/hBN w temperaturach kriogenicznych: rzędu kilku pikosekund i malejącego z koncentracją elektronów swobodnych dla rozpraszania międzypolinowego oraz rzędu kilkudziesięciu pikosekund i malejącego z koncentracją dla czasu życia;
5. Wyznaczenie skali czasu formowania się ekscytonu naładowanego rzędu kilku pikosekund i znacząco malejącego (do skali czasowej rzędu kilkuset femtosekund) w funkcji koncentracji elektronów w heterostrukturze hBN/MoSe₂/hBN w eksperymencie pompa-sonda w temperaturach kriogenicznych;
6. Wyznaczenie skali czasowej związanej z procesem dekoherencji ekscytonu neutralnego w funkcji koncentracji elektronów swobodnych w eksperymencie mieszania czterech fal dla heterostruktury hBN/MoSe₂/hBN w temperaturach kriogenicznych (rzędy pojedynczych pikosekund do kilkuset femtosekund przy wzroście koncentracji elektronów);
7. Wykazanie wpływu rosnącej koncentracji elektronów na przyspieszenie procesu dekoherencji ekscytonu neutralnego i naładowanego (maleje T₂), skrócenie jego radiacyjnego czasu życia (maleje T₁) na skutek zaproponowanego mechanizmu ekranowania potencjału dielektrycznego, również prowadzącego do wzrostu siły koherentnego sprzężenia między ekscytonem neutralnym i ekscytonem naładowanym;
8. Wykazanie, że czas koherencji ekscytonu neutralnego ograniczony jest jego czasem życia, a w przypadku ekscytonu naładowanego dekoherencja jest związana z procesem czystej dekoherencji związanej z rozpraszaniem elastycznym w układzie;
9. Wyznaczenie siły koherentnego sprzężenia ekscyton neutralny – ekscyton naładowany w heterostrukturze hBN/MoSe₂/hBN.

O znaczeniu rezultatów badań świadczą artykuły naukowe autora dysertacji opublikowane w bardzo dobrych, renomowanych i recenzowanych czasopismach



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

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

Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
<http://wppt.pwr.edu.pl>

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



naukowych. We wszystkich tych publikacjach Pan Aleksander Rodek odgrywał znaczącą rolę:

- A. Rodek i współautorzy, *Nanophotonics* 10, 2717-2728 (2021);
- A. Rodek i współautorzy, *Nanophotonics* 13, 487-497 (2024);
- A. Rodek i współautorzy, *2D Materials* 10, 025027 (2023);

W mojej opinii rozprawa spełnia wszystkie zwyczajowe jak i ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim (ust. z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki – Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami). **Praca prezentuje wiedzę teoretyczną kandydata na wysokim poziomie w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.**

W mojej ocenie Pan Aleksander Rodek ma umiejętności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiot rozprawy stanowi oryginalny wkład autora w obszar badań nad właściwościami dynamicznymi wzbudzeń optycznych w kryształach warstwowych z rodziny dichalkogenków metali przejściowych w szczególności MoSe_2 . Tematyka ta wpisuje się w obecnie eksplorowane trendy badawcze na świecie, w których materiały warstwowe pełnią szczególną rolę ze względu na ich właściwości fizyko-chemiczne. Wyniki badań autora mają znacznie dla rozwoju fizyki w kraju i za granicą z dużym potencjałem oddziaływania na społeczność naukową, a w przyszłości, być może na sferę gospodarczą.

Konkludując, pozytywnie oceniam recenzowaną dysertację i wnioskuję do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie Pana mgr. inż. Aleksandra Rodka do dalszych etapów procesu doktorskiego.

Dodatkowo wnioskuję do Rady o wyróżnienie pracy. W podstawie wyróżnienia podkreślam ogromną pracę jaką należy wykonać w toku realizacji eksperymentu pompa-sonda z wynikami zaprezentowanymi w rozdz. 3 i 4. Eksperyment ten należy do jednych z trudniejszych w realizacji, wymaga jednoczesnej kontroli wielu parametrów, precyzji oraz cierpliwości, a interpretacja wyników to trudne zadanie z którą autor dysertacji poradził sobie znakomicie.

Struktura pracy i zawartość rozdziałów, pytania do pracy i uwagi redakcyjne

Struktura pracy i zawartość rozdziałów

W rozdziale 1, autor wprowadza w zagadnienia związane dichalkogenkami metali przejściowych, w tym opisując strukturę krystaliczną oraz strukturę pasmową, podając ważne z punktu widzenia pracy skale energetyczne oraz wprowadza do



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

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

Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
<http://wppt.pwr.edu.pl>

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



pojęcia ekscytynu neutralnego i ekscytynu naładowanego (trionu) jak fundamentalnych wzbudzeń w tym materiale.

W **rozdziale 2**, autor prezentuje badane struktury stanowiące hybrydowe układu z MoSe_2 zamkniętymi w izolujących okładkach z heksagonalnego azotku boru, w tym posiadających kontakty elektryczne, celem modulowania koncentracji swobodnych nośników w warstwie MoSe_2 . (struktury wykonane przez dr. Karola Nogajewskiego z UW oraz dr. Jamesa Howarta z Uniwersytetu w Manchester). Również w tym rozdziale, autor szacuje z geometrycznego modelu kondensatora płaskiego maksymalną koncentrację nośników w warstwie MoSe_2 na poziomie $n/V_g = 5.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ V}^{-1}$ oraz $n/V_g = 3.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ V}^{-1}$ dla dwóch typów badanych urządzeń, co jest ważne dla zbieżności z późniejszymi wynikami eksperymentalnymi. Rozdział 1 kończy przedstawienie wyników wysoko-przestrzennie-rozdzielonego odbicia i fotoluminescencji w funkcji przyłożonego napięcia do urządzenia, gdzie autor demonstrowa przełączanie się struktury z reżimu neutralnego do reżimu obecności swobodnych nośników w strukturze na skutek bramkowania/przykładania napięcia elektrycznego.

W **rozdziale 3**, autor przedstawia wyniki dynamiki ekscytonów neutralnych, badanej w eksperymencie pompa-sonda z jednoczesną detekcją rozdzieloną spektralnie dla układu $\text{hBN}/\text{MoSe}_2/\text{hBN}$ oraz $\text{MoSe}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ bez bramkowania elektrycznego i w temperaturach kriogenicznych. W pierwszej części rozdziału, autor opisuje konfigurację eksperymentu, który jest dość trudny w realizacji. **Uznaję tę część pracy za bardzo ważną, wymagającą wielu umiejętności i wiele cierpliwości potrzebnej dla uzyskania zadowalającego rezultatu.** Wykonany eksperyment prowadzony był w konfiguracji zdegenerowanej pompy i sondy i wymagał zabiegów separujących obydwa sygnały na chipie krzemowej kamery CCD. W dalszej części tego rozdziału, autor przedstawia podejście do analizy sygnału na kamerze CCD, który w swojej istocie jest modulowanym sygnałem odbicia wiązki sondującej na skutek periodycznego pobudzania próbki impulsem pompującym. Wykorzystanie metody Kramersa-Kroniga transformacji rejestrowanego spektrum doprowadziło do wyznaczenia ewolucji w czasie absorpcji ekscytonowej w układzie MoSe_2 w temperaturach kriogenicznych, pokazanej w rozdziale 3.3. W dalszej części rozdziału, z analizy danych wyznaczono takie parametry jak czas dekoherencji ekscytynu oraz oszacowano siłę oddziaływania ekscyton-ekscyton w populacji. W podrozdziale 3.3.3 zaprezentowano model pola lokalnego zaproponowany przez dr. Thilo Hahna oraz dra Daniela Wiggera, które bardzo dobrze odwzorowuje zachowanie spektralne i obserwowaną dynamikę ekscytonów w MoSe_2 . Zbieżność modelu z wynikami eksperymentalnymi pozwoliła na wyznaczenie czasu releksacji ekscytonów $T_1 = 1.7 \text{ ps}$ oraz czasu rozpraszania międzycząsteczkowego 114 fs , czasu koherencji $T_2 = 0.3 \text{ ps}$ w badanych układach. Rozdział 3 kończy podsumowanie uzyskanych wyników.

W obszernym **rozdziale 4**, autor przedstawił wyniki badań nad dynamiką wzbudzeń ekscytonowych w obecności swobodnych nośników uzyskanych w procesie bramkowania elektrycznego układu $\text{hBN}/\text{MoSe}_2/\text{hBN}$. Dynamika rejestrowana była w eksperymencie pompa-sonda opisanym w rozdz.3. W rozdz. 4.1 przedstawiono ilościową analizę dot. optycznej odpowiedzi układu MoSe_2 w funkcji



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

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

Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
<http://wppt.pwr.edu.pl>

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



napięcia kondensatora, w tym zmiany siły oscylatora przejścia ekscytynu neutralnego i ekscytynu naładowanego oraz zmiany energii przejścia i poszerzenia spektralnego ekscytynu neutralnego, wraz z podaniem parametrów tych procesów określonych przez odpowiednie współczynniki. W rozdz. 4.2, w pierwszej części, autor skupił się na efektach związanych z selektywnym pobudzaniem ekscytynów neutralnych i naładowanych rozdzielonych dolinowo oraz międziodolinowych, biorąc pod uwagę wpływ dodatkowej gęstości nośników swobodnych indukowanych napięciem na kondensatorze. Pod uwagę wzięte zostały takie parametry jak zmiana energii przejścia, poszerzenie oraz amplituda odpowiedzi optycznej/absorpcji. W tym rozdziale wyznaczone zostały skale czasowe procesów dynamicznych w funkcji koncentracji elektronów swobodnych w heterostrukturze hBN/MoSe₂/hBN, w tym: rozpraszanie międziodolinowe ekscytynów naładowanych rzędu pojedynczych pikosekund i malejące z koncentracją elektronów, czas życia ekscytynu naładowanego rzędu kilkudziesięciu pikosekund i malejący z koncentracją elektronów. W rozdz. 4.3, przedstawiona zostaje interesująca kwestia formowania się ekscytynu naładowanego w heterostrukturze hBN/MoSe₂/hBN w funkcji koncentracji elektronów swobodnych i wyznaczona zostaje skala procesu formowania, która wynosi od kilku pikosekund do kilkuset femtosekund przy zwiększeniu koncentracji elektronów swobodnych. W rozdz. 4.4, zaprezentowano problemy związane z uzyskaniem stabilnego elektrycznego domieszkowania heterostruktury hBN/MoSe₂/hBN swobodnymi dziurami. Rodz. 4.5 ogólnie podsumowuje dokonania opisane w całym rozdziale 4.

W **rozdziale 5**, przedstawione została dynamika koherencji i populacji ekscytynów w heterostrukturze hBN/MoSe₂/hBN w temperaturach kriogenicznych w obecności gazu elektronowego określone w eksperymencie mieszania czterech fal. Eksperyment wykonano przy współpracy z dr. Jackiem Kasprzakiem w Instytucie Neela w Grenoble, Francja, a analiza teoretyczna prowadzona była z użyciem modeli zaproponowanych przez dr. Thilo Hahna oraz dr. Daniela Wiggera. W pierwszej części, autor przedstawia wyniki eksperymentu FWM w konfiguracji pomiaru echa fotonowego pozwalającego na wyznaczenie czasu koherencji T_2 oraz spektralnego poszerzenia jednorodnego i niejednorodnego. W rozdz. 5.3, opisany jest rezultat badań w eksperymencie FWM zaniku populacji ekscytynów neutralnych i naładowanych w funkcji koncentracji elektronów. W rozdz. 5.4 przedstawiono wyniki eksperymentu FWM służące wyznaczeniu koherentnego sprzężenia między ekscytynem neutralnym i ekscytynem naładowanym.

W **rozdziale 6**, przedstawiona została dynamika zaniku fotoluminescencji ekscytynów neutralnych i naładowanych przy pobudzaniu nierezonansowym w polu magnetycznym do 30 T w konfiguracji Faradaya. Badania te prowadzone były wspólnie dr. Kacprem Oreszczukiem i dr. Dipankarem Janą w Laboratorium Wysokich Pól Magnetycznych (LCNMI) w Grenoble we Francji w ramach Europejskiego Laboratorium Pól Magnetycznych (EMFL). W rozdz. 6.1 opisany został układ eksperymentalny, a w rozdz. 6.2 wyniki eksperymentalne dla elektrostatycznie domieszkowanej, enkapsulowanej w hBN warstwy MoSe₂. Wreszcie w rozdziale 6.3 przedstawione jest podsumowanie.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

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

Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
<http://wppt.pwr.edu.pl>

REGON: 00001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Dodatkowo praca zawiera całkowite podsumowanie w **rozd.7** z wykazaniem tych elementów, które autor uznaje za najbardziej istotne w przedstawionym dorobku.

Na zakończenie autor przedstawia istotny dla zrozumienia pracy dodatek w postaci omówienia Heterodynowej Interferometrii Spektralnej mieszania czterech fal, oraz tabelę ze współczynnikami załamania wykorzystywanych w symulacji macierzy przejścia.

Praca kończy się **Listą artykułów wieloautorskich opublikowanych w czasopiśmie recenzowanych**, w których autor dysertacji był współautorem, **Listę osób i instytucji, które wygłosiły referaty na konferencjach międzynarodowych**, oraz **Bibliografię** zawierającą 97 pozycji.

Pytania do pracy:

1. W rozdziale 1 autor przedstawia wyniki wysoko-rozdzielonego przestrzennie odbicia i fotoluminescencji w funkcji przyłożonego napięcia do urządzenia. Czy możliwym jest, użyciem tych wyników, oszacowanie położenia poziomu Fermiego i w tym sensie wyznaczenia koncentracji nośników w warstwie MoSe₂? Jeśli nie jest możliwe, to jakie fundamentalne ograniczenia ma taka procedura szacowania w przypadku badanego układu?
2. Dlaczego autor nie przedstawił charakterystyki I-V urządzenia z MoSe₂? Skąd wiadomo, czy zdefiniowany kondensator nie miał kanałów upływności, które determinowałyby maksymalny ładunek?
3. Na Rys. 2.4, ewolucja sygnału fotoluminescencji i odbicia wygląda na bardzo gwałtowną w zakresie niskich napięć. Wygląda na to, że układ natychmiast przełącza się pomiędzy reżimem neutralności i reżimem obecności nośników wyindukowanych bramką (widoczne w gwałtownym transferze intensywności obserwowanego sygnału). Dlaczego ta zmiana jest tak gwałtowna? Czy jest jakieś wytłumaczenie tej obserwacji?
4. W rozdziale 3.3 autor przedstawia wynik zastosowania metody analizy Kramersa-Kroniga do uzyskanych widm odbitej od struktury MoSe₂ sondy w celu wyznaczenia ewolucji absorpcji. Dlaczego nie zostały zaprezentowane dane wejściowe do tej analizy? Byłoby to bardzo pouczające. Dodatkowo w rozdziale 3.3.1 i na Rys. 3.7 pokazano, jak zależy amplituda sygnału $\Delta R/R$ w obszarze obserwacji precesji swobodnej, do czego potrzebne były dane $\Delta R/R$, czy to jest problem podpisu rysunku, gdzie w zasadzie pokazano wynik analizy Kramersa-Kroniga.
5. Rysunek 3.8 (a) podpisany jest jako kontrast odbicia a w tekście mowa jest o analizie odbicia. W jaki sposób ten kontrast był rejestrowany? Typowo mierzone jest odbicie od próbki oraz odbicie poza próbką i te dwa sygnały wykorzystywane są do wyznaczania kontrastu.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
http://wppt.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



6. W rozdz. 3.3.2 wyznaczono całkowitą absorpcję światła w MoSe_2 na poziomie 6.3% jednakże prosty rachunek dla warstwy MoSe_2 ze współczynnikiem absorpcji na poziomie $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ i grubości $d=0.65 \text{ nm}$ wynosi 3.2%, co oznacza, że wyznaczona koncentracja ekscytonów w tymże rozdziale może być przeskalowana 2-krotnie. Być może nie zmieni to ostatecznych wniosków wynikających z tego szacowania.
7. Na zmianę populacji ekscytonów, szacowanej w rozdz. 3.3.2 może mieć wpływ dyfuzja spowodowana gradientem pola elektromagnetycznego w wiązce gaussowskiej sondy/gradients populacji ekscytonów. Czy dyfuzja była brana pod uwagę? Ta będzie wpływać na procesy dynamiczne, powodując ubytek populacji z obszaru próbkowania wiązką sondującą. No chyba, że droga dyfuzji jest znacznie mniejsza/porównywalna z rozmiarem obszaru próbkowania wiązki sondującej. Jednakowoż proces dyfuzji może sprzyjać zwiększeniu się intensywności rekombinacji niepromienistej.
8. W literaturze oraz kręgach naukowych zajmujących się naładowanymi kompleksami ekscytonowymi istnieje brak spójności dotyczącej nazewnictwa, a także opisu związanego z fizyką ekscytonów naładowanych. Linia podziału związana jest z faktem czy traktować ekscyton naładowany jako obiekt złożony z elektronu i dziury oraz dodatkowego pojedynczego nośnika ubranych w oddziaływania kulombowskie i potocznie zwanego trionem, czy też jako neutralnego ekscytonu ubranego w oddziaływania z możem Fermiego nośników swobodnych i często zwanego polaronem Fermiego. Czy autor pracy spotkał się z tym podziałem, i z jego perspektywy, który obraz jest zasadny do opisu właściwości ekscytonów naładowanych, a może nie ma to dużego znaczenia?
9. Jaka jest niepewność wyznaczenie czasu koherencji T_2 przedstawionych w Rozdz. 5.2 oraz wyznaczenia poszerzenia jednorodnego i niejednorodnego i z czego wynika?
10. W rozdziale 5.2 na stronie 5.7 pojawia się komentarz dotyczący zmiany poszerzenia jednorodnego: „W zakresie tych samych napięć, poszerzenie jednorodne X^- jest mniejsze niż ekscytonu neutralnego, ale podobnie wykazuje istotny wzrost od 1.5 meV do ok. 2 meV z tym, że przy większych koncentracjach elektronów.”. Nie ma komentarza, dlaczego to poszerzenie najpierw maleje z 2 meV do 1.5 meV przy mniejszych wartościach koncentracji elektronów. Czy jest na to jakieś wytłumaczenie? Być może zmiany tego poszerzenia są nieistotne w zakresie niepewności jego wyznaczenie za pomocą stosowanego modelu. Wtedy słowa „istotny wzrost” w cytowanym zdaniu tracą swoje znaczenie.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
<http://wppt.pwr.edu.pl>

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



11. W rozdziale 5.2, str. 79 opisany został mechanizm związany z ekranowaniem potencjału dielektrycznego przez zwiększenie koncentracji nośników, które prowadzi do delokalizacji ekscytynu neutralnego i skrócenia czasu życia. Ta zaproponowana koncepcja jest sensowna. Czy autor brał pod uwagę rosnącą rolę procesu dyfuzji, którego można się spodziewać, kiedy potencjał lokalizujący jest ekranowany? Być może istnieją argumenty, które mówią o tym, iż rolę dyfuzji można pominąć?
12. W rozdz. 5.3, str. 82, przedstawione jest funkcja (5.4), którą stosuje się do wyznaczania parametrów procesu FWM. Jak autor poradził sobie z taką ilością parametrów w procesie dopasowania funkcji do danych doświadczalnych?

Kontrowersje językowe:

1. Na stronie 101 znajduje się zdanie „Bardzo ważną obserwacją było zauważenie ...” wydaje mi się, że słowo „zauważenie” nie jest tu już potrzebne.

Dr. hab. inż. Marcin Syperek



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

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

Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

budynek A-1, pok. 234

Tel: +48 71 320 25 79,
+48 71 320-23-95

dziekan.wppt@pwr.edu.pl
<http://wppt.pwr.edu.pl>

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Nr konta:

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434