



Prof. dr. Paulina Plochocka
Directeur de recherche
Tel: +33 (0) 562 17 28 62
Fax: +33 (0) 562 17 28 16
E-mail: paulina.plochocka@lncmi.cnrs.fr

LNCMI - Toulouse
Centre National de la Recherche Scientifique
143, avenue de Rangueil
31400 Toulouse
France

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Aleksandra Rodka

Rozprawa doktorska Pana Aleksandra Rodka jest poświęcona badaniu dynamiki kompleksów ekscytonowych w dwuwymiarowych półprzewodnikach. Mgr Rodek w swojej rozprawie podjął się zbadania wzajemnego oddziaływania pomiędzy gazem elektronowym i ekscytonami, skupiając uwagę na wpływie tych oddziaływań na dynamikę ekscytonów, w szczególności ich koherencję i populację. Badania zostały przeprowadzone przy użyciu takich technik eksperymentalnych, jak pompa-sonda oraz mieszanie czterech fal. Badanym materiałem były monowarstwy MoSe_2 , jednego z przedstawicieli dichalkogenków metali przejściowych, gdzie koncentracja nośników była kontrolowana przez wykonanie odpowiednich bramek i kontaktów elektrycznych. Rozprawa jest podzielona na 7 rozdziałów, z których 5 jest poświęconych pracy doktoranta.

Pierwszy rozdział pracy doktorskiej wprowadza czytelnika w zagadnienia warstwowych półprzewodników, takich jak dwusiarczki i dwuselenki wolframu czy molibdenu. Wstęp jest niestety dość pobieżny, pozostawiając czytelnikowi duży niedosyt podstawowych informacji, które mogłyby być pomocne w dyskusji rezultatów uzyskanych w czasie doktoratu i przedstawionych w rozprawie. Mgr Rodek nie przedstawia głębszego opisu własności elektronowych oraz struktury pasmowej tych materiałów, co, w mojej opinii, niestety nie pozwala na ocenę, jak szeroka jest jego wiedza na temat tych materiałów. Również należy zwrócić uwagę na brak dobrze zdefiniowanych problemów badawczych/hipotez, które by stanowiły inspirację do przeprowadzenia badań.

Drugi rozdział rozprawy jest poświęcony opisowi przygotowania próbek, które zostały użyte w czasie badań oraz ich prostej charakteryzacji optycznej. Doktorant dość szczegółowo opisuje przygotowanie monowarstw MoSe_2 enkapsulowanych obustronnie w heksagonalnym azotku boru, a następnie wykonanie kontaktów elektrycznych, które zostały później wykorzystane do kontroli koncentracji nośników. Przedstawione zostały również szczegółowe wyliczenia, jak napięcie przyłożone do próbki jest przeliczane na efektywną koncentrację nośników. Dokładny opis wytworzenia struktur stanowi istotną wartość tej pracy i może być pomocny dla innych badaczy zajmujących się przygotowaniem struktur. Recenzent zauważa, że to nie mgr Rodek przygotowywał struktury, a zostały one wykonane i scharakteryzowane metodami typu AFM przez innych członków zespołu. Jednakże dokładny ich opis świadczy, iż doktorant rozumie „co się w nich dzieje”.

W drugiej części tego rozdziału są przedstawione wyniki wstępnej charakteryzacji optycznej i elektrycznej struktur. O ile ta część jest poprawna, to niektóre obrazki wskazują na nieuważność doktoranta. Np. przedstawiając na obrazku 2.3 (a) widmo odbicia oraz fotoluminescencji razem, nie można się oprzeć wrażeniu, że nie pochodzą one z tego samego miejsca, ponieważ energia emisji ekscytonu neutralnego jest wyższa niż energia tego przejścia w widmie odbicia. Zakładając, że jest to to samo miejsce, wykres prowadzi do nieoczywistej konkluzji, że emisja jest przesunięta w stronę wyższych energii w stosunku do absorpcji. Jeśli jest to faktycznie wynik pomiarów pochodzących z tego samego miejsca na próbce, to powinno to zostać wyjaśnione lub co najmniej skomentowane. Z drugiej strony należy docenić dogłębną analizę wpływu hBN na odpowiedź optyczną i statystyczną analizę odpowiedzi z próbki, co pozwoliło na dalsze prowadzenie badań w obszarach charakteryzujących się najlepszą jakością optyczną.

Rozdział trzeci jest poświęcony opisowi badań dynamiki ekscytonów neutralnych, używając techniki pompa-sonda. Rozdział ten zaczyna się od rzetelnego opisu układu doświadczalnego. To, co jest bardzo ważnym i pozytywnym aspektem, przedyskutowanym w tym rozdziale, to bardzo dokładny opis analizy danych. Pan mgr Rodek w bardzo szczegółowy sposób opisał metodę macierzy przejścia, która jest potem przez niego używana do analizy widm odbicia w funkcji opóźnienia pomiędzy impulsami pompującym i próbkującym. Następnie przedstawiona została do porównania analiza widm metodą Kramersa-Kroniga. Zasadnicza część tego rozdziału jest poświęcona wynikom eksperymentalnym, a mianowicie badaniu dynamiki ekscytonu neutralnego przy rezonansowym pobudzaniu. Zanim mgr Rodek przedstawił główne wnioski płynące z eksperymentu, dość szczegółowo omówił, co dzieje się w poszczególnych przedziałach czasowych, a mianowicie w ujemnych opóźnieniach, zerowym opóźnieniu i dodatnim opóźnieniu. Na przykład został szczegółowo omówiony proces zaniku precesji swobodnej. Przedstawienie w ten sposób wyników wskazuje, że mgr Rodek dość dobrze rozumie mechanizmy fizyczne zachodzące w półprzewodnikach, które mogą być obserwowane w tego typu eksperymentach.

Interesującym aspektem, omówionym w tym rozdziale, jest porównanie wyników eksperymentalnych z modelem teoretycznym. Na podstawie tej analizy udało się określić wpływ efektów nieliniowych na odpowiedź spektralną ekscytonów neutralnych oraz dynamikę ich relaksacji. Mgr Rodek wyznaczył również siłę oddziaływania ekscyton-ekscyton, a model teoretyczny bardzo dobrze odtworzył ewolucję spektralną i czasową przejścia ekscytonowego. Porównanie modelu i wyników eksperymentalnych pozwoliło wyznaczyć czas zaniku populacji ekscytonów oraz ich czas rozpraszania międzypolinowego. O ile wyniki pomiarów, ich analiza oraz konfrontacja z modelem teoretycznym są bardzo dobrze przedstawione, to brakuje dobrego umiejscowienia tych wyników na tle dostępnej literatury i przedyskutowania ich wobec obecnego stanu wiedzy. Byłoby bardzo interesujące, gdyby doktorant pokusił się o szerszy przegląd literaturowy, który pozwoliłby zrozumieć czytelnikowi, co nowego wniosły badania opisane w rozprawie oraz jak wyniki, takie jak np. czas rozpraszania międzypolinowego, odnoszą się do tego, co wiemy z literatury.



Kolejnym nasuwającym się pytaniem jest, jak inne procesy relaksacji ekscytynu mogą wpływać na obserwowane zjawiska. Mgr Rodek nie rozważa np. tworzenia bieksytynu – XX. W eksperymentach typu pompa-sonda, ze względu na chwilowo duże gęstości mocy wzbudzania, można spodziewać się tworzenia bieksytynów.

Dodatkowo, mgr Rodek dyskutuje rozpraszanie międzypolinowe. Powstaje naturalne pytanie, jaki mechanizm kryje się za rozpraszaniem polinowym i jak ważny jest on w przypadku pobudzania rezonansowego? W takim przypadku ekscytyny mają prawie zerową energię kinetyczną, osłabiając rozpraszanie w wyniku oddziaływania wymiennego. Można się zatem zastanawiać, co wówczas powoduje międzypolinową relaksację [Phys. Rev. B 89, 205303].

W rozdziale czwartym mgr Rodek skupia się na dynamice ekscytynów w obecności nośników swobodnych, których koncentracja jest kontrolowana i zmieniana, używając elektrostatycznego bramkowania. Analizowana jest dynamika przejść ekscytynu naładowanego oraz neutralnego przy selektywnym pobudzaniu każdego z tych przejść. Aby opisać uzyskane wyniki, mgr Rodek zaproponował model uwzględniający różne mechanizmy relaksacji, takie jak relaksacja międzypolinowa ekscytynów neutralnych, formowanie ekscytynów naładowanych lub relaksacja międzypolinowa nośników swobodnych. Ten prosty model dość dobrze opisuje wyniki eksperymentalne. Udało się też wyznaczyć zależności charakterystycznych czasów zaniku w funkcji koncentracji nośników.

Generalnie wyniki przedstawione w tym rozdziale są zrozumiałe przedstawione i wartościowe, brakuje jednak głębszego ich umiejscowienia w literaturze. Doktorant mógłby się pokusić o rozszerzoną dyskusję uzyskanych wyników oraz ich potencjalnej nowości w oparciu o bardzo szeroką i dostępną literaturę. Kolejnym pytaniem, które się nasuwa, jest, jakie są limity uproszczonej analizy dynamiki kompleksów ekscytynowych bez uwzględnienia ich oddziaływania z morzem nośników – obraz polaronu Fermiego. Na końcu rozdziału czwartego jest przedstawiona pobieżna analiza widma dla domieszkowania na typ p, które wydaje się nie zadziałało prawidłowo. Czy doktorant mógłby przedstawić zarys idei, dlaczego domieszkowania na typ p nie udało się uzyskać?

W rozdziale piątym są opisane badania wpływu nośników na ultraszybką dynamikę koherencji i populacji kompleksów ekscytynowych na podstawie pomiarów mieszania czterech fal. Jest to bardzo interesująca część doktoratu, gdzie mgr Rodek pokazuje, iż czasy dekoherencji oraz zaniku populacji ekscytynów neutralnych oraz naładowanych silnie zależą od koncentracji nośników. Wyniki przedstawione w tym rozdziale są interesujące i zdecydowanie była to najbardziej wymagająca część pracy doświadczalnej, ze względu na skomplikowaną technikę eksperymentalną. Rozdział ten ponownie pozostawia pewien niedosyt, jako że korelacje pomiędzy kompleksami ekscytynowymi mogłyby być szerzej przedyskutowane, zwłaszcza w odniesieniu do istniejącej literatury.

Rozdział szósty jest poświęcony pomiarom dynamiki fotoluminescencji w silnym polu magnetycznym dla różnych koncentracji nośników. Mgr Rodek zaproponował prosty model, w którym zaobserwowane wydłużenie czasu formowania ekscytynu naładowanego zostało wytłumaczone zwiększeniem lokalizacji nośników swobodnych przez zewnętrzne pole magnetyczne. Jest to bardzo uproszczony model, ponieważ ekscytyny, triony oraz nośniki swobodne są traktowane w sposób niezależny, co nie jest do końca właściwe. Niestety, takie procesy jak rozpraszanie międzypolinowe oraz rozkład populacji nośników po przyłożeniu



poła na skutek przesunięć energetycznych dolin w polu magnetycznym nie zostały wzięte pod uwagę. Pojawia się więc naturalne pytanie: jak te efekty wpłyną na interpretację wyników?

Rozdział siódmy stanowi podsumowanie pracy.

Podsumowując, praca doktorska mgr Rodka jest poświęcona badaniu dynamiki kompleksów ekscytonowych w monowarstwie MoSe_2 dla różnych koncentracji nośników. Wykorzystane zostały różne metody ultraszybkiej spektroskopii, takie jak pompa-sonda, mieszanie czterech fal czy pomiary luminescencji w polu magnetycznym. Uzyskane wyniki prowadzą do spójnych konkluzji dotyczących tego, jak swobodne nośniki wpływają na koherencję oraz charakterystyczną dynamikę ekscytonu neutralnego i naładowanego.

Przedstawiona rozprawa wzbudza mieszane odczucia recenzenta. Z jednej strony imponuje zaawansowanie technik eksperymentalnych i niewątpliwie ogromny nakład pracy włożony w badania przez Doktoranta. Z drugiej strony, niezależnie od interesujących wyników o bardzo dużej wartości eksperymentalnej, Doktorant nie pokusił się o głębsze wnioski płynące z zaawansowanej analizy oraz właściwe ich przedyskutowanie w świetle istniejącej, bardzo bogatej literatury. Pozostawia to głęboki niedosyt u czytającego.

Głębsza analiza pojawia się dla tych wyników, które zostały dopełnione modelem teoretycznym wykonanym przez współpracowników. Jednak mimo opisanych niedostatków, rozprawa doktorska spełnia wymogi jej stawiane i wnioskuję o dopuszczenie do obrony. Równocześnie, z przykrością stwierdzam, że nie mogę wnioskować o jej wyróżnienie, pomimo iż sam materiał eksperymentalny jest imponujący.

Paulina Plochocka