

Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr Rafała Mirka
pt. *Nonlinear effects of exciton polaritons applied in neuromorphic networks*

Rozprawa doktorska mgr. Rafała Mirka została przygotowana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr hab. Barbary Piętki. Praca dotyczy zastosowania polarytonów ekscytonowych w obliczeniach neuromorficznych. Polarytony ekscytonowe to kwazi-cząstki będące konsekwencją silnego oddziaływania światła z materią w mikrownękach półprzewodnikowych. Chociaż właściwości polarytonów ekscytonowych badane są od 30 lat, zastosowanie ich do obliczeń lub symulacji układów złożonych jest bardzo aktualnym, a także wieloaspektowym problemem, którym interesuje się duże grono badaczy na całym świecie. Jest to tematyka leżąca na pograniczu technologii nanostruktur półprzewodnikowych, ich spektroskopii oraz przetwarzania informacji. Wymaga więc współpracy specjalistów różnych dziedzin, a także nawigowania pomiędzy różnymi zagadnieniami i rozwiązywania problemów bardzo różnej natury. Praca doktorska pana Mirka ma zatem zdecydowanie wielodyscyplinarny charakter. Skompletowanie badań składających się na jego rozprawę bez wątpienia wymagało od niego zrozumienia różnych aspektów tej tematyki: od wytworzenia struktur zapewniających silne sprzężenie, przez wykonanie, opracowanie i zinterpretowanie danych doświadczalnych, do zastosowania wyników w obliczeniach neuromorficznych. To wszystko z kolei wymagało umiejętności komunikowania się z członkami zespołu badawczego, którzy, zapewne, używali różnych języków. Piszę o tym, aby podkreślić moje uznanie dla wykonanej pracy.

Część wyników uzyskanych przez Autora została opublikowana w bardzo szanowanych czasopiśmie — *Physical Review Applied* oraz *Nano Letters* — a także została przedmiotem krajowego zgłoszenia patentowego. Rozprawa jest napisana w języku angielskim, składa się z 12 rozdziałów i liczy 97 stron. Chociaż przypuszczam, iż angielski nie jest pierwszym językiem mgr. Mirka, praca pod względem językowym jest, moim zdaniem, napisana bardzo poprawnie i czytelnik nie ma wrażenia, że czyta dzieło napisane w języku obcym autora. Rysunki są estetyczne, generalnie czytelne i jasno opisane. Dobór bibliografii, 177 pozycji, jest właściwy, a Autor cytuje nie tylko prace najnowsze, ale sięga głęboko do źródeł. Pierwszy rozdział zawiera krótkie wprowadzenie do fizyki ekscytonów, mikrownęk półprzewodnikowych, polarytonów ekscytonowych i ich kondensatów oraz fizyki półprzewodników półmagnetycznych. Kolejny rozdział przedstawia bardzo ogólnie działanie sieci neuronowej oraz sygnalizuje ewentualne przewagi jej optycznej realizacji. Rozdział 3 zawiera opis próbek będących przedmiotem badań Autora i uogólniony schemat układu doświadczalnego. Dokładniejsze opisy układów pomiarowych przedstawione są w kolejnych rozdziałach. Kolejne rozdziały, od 4 do 11, zawierają oryginalne wyniki Autora. Rozdziały te są dość krótkie, każdy jest poświęcony osobnemu, konkretnemu problemowi. Rozdział 12 to podsumowanie pracy. Uważam, że struktura rozprawy mgr. Mirka jest bardzo logiczna. Brakuje mi natomiast jasno postawionego celu pracy i motywacji do zastosowania konkretnych narzędzi, w szczególności użycia próbek z

materiałów II-VI. Myślę, że taki rozdział ułatwiłby zrozumienie kolejnych kroków, jakie Autor podejmuje i pozwoliłby lepiej docenić jego pracę. Na przykład, zademonstrowanie działania sieci neuromorficznych w rozdziałach 10 i 11, nie wymaga zjawisk opisanych w rozdziałach 6, 7, 8 i 9.

Za najważniejszy wynik pracy mgr. Mirka uważam przedstawienie działania binarnej, polarytonowej sieci neuronowej działającej w oparciu o dwa oddziałujące kondensaty Bosego-Einsteina. Autor demonstruje najpierw działanie bramki XOR zrealizowanej poprzez selektywne pobudzenie dwóch obszarów lokalizujących kondensaty, poniżej i powyżej progu ich tworzenia. Następnie, zwielokrotnione bramki XOR użyte są do wytworzenia binarnej sieci neuronowej, zastosowanej do rozpoznawania odręcznie pisanych cyfr. Proces ten polega na zastosowaniu algorytmu klasyfikacji liniowej działającego w komputerze. Autor idzie jeszcze dalej i przedstawia działanie całkowicie optycznej bramki XOR, co — jak zaznacza — przybliża nas do wykorzystania potencjału sieci optycznych.

Moje ogólne wrażenie z lektury rozprawy mgr. Mirka jest dwojakie. Z jednej strony uważam, że niewątpliwie wykonał on imponujące, wielowymiarowe eksperymenty i zastosował ich wyniki do zrealizowania układu, który jest w awangardzie badań nad przetwarzaniem informacji. Z drugiej jednak strony wyniki doświadczalne opisane są językiem — żeby użyć informatycznego porównania — niezwykle wysokopoziomowym: Autor zakłada, że czytelnik będzie znał i rozumiał niuanse spektroskopii polarytonów ekscytonowych. Adresatem rozprawy jest zatem ekspert w wąskiej dziedzinie. Uważam, że takie podejście jest z jednej strony wyborem łatwej drogi, a z drugiej — przegapioną okazją. Ekspert przeczyta raczej publikacje w czasopismach, a nie doktorat. Uważam, że ambitniejszym i bardziej pożytecznym byłoby wyjaśnienie zjawisk fizycznych stojących za tymi imponującymi wynikami językiem, który będzie zrozumiały dla młodszych kolegów i koleżanek Autora, np. rozpoczynających karierę doktorantów.

Przejdę teraz do bardziej szczegółowego omówienia pracy pana mgr. Mirka. Chciałbym prosić, aby w czasie publicznej obrony Autor udzielił odpowiedzi na pojawiające się poniżej pytania i wątpliwości używając aparatu pojęciowego dostępnego dla osoby rozpoczynającej doktorat (tj. nie-eksperta).

Jak wspomniałem, rozdział 1 zawiera wprowadzenie do fizyki polarytonów ekscytonowych. Omówione zjawiska rzeczywiście dają dobry wstęp do tej tematyki. Niestety, w kontekście problemów i pojęć z jakimi Autor mierzy się w swojej pracy, rozdział ten jest raczej bezużyteczny, gdyż traktuje tylko o właściwościach bardzo fundamentalnych. Badania mgr. Mirka opisane w kolejnych rozdziałach dotyczą subtelnych zjawisk występujących w oddziałujących (lub nie) kondensatach polarytonowych (jak np. właściwości spójności emisji światła przez kondensaty: rozdziały 5.3, 7 i 8), natomiast we wstępie (rozdział 1.5) kondensaty Bosego-Einsteina skwitowane są niecałą stroną raczej popularnonaukowej beletrystyki. Ten język zupełnie nie przystaje do języka użytego następnie w opisie wyników. W rozdziale 1.3 Autor omawia oddziaływanie między polarytonami poprzez ich składową ekscytonową. To jest bardzo ważny aspekt pracy, gdyż to

oddziaływanie wykorzystane jest następnie do wytworzenia nieliniowych właściwości kondensatów (rozdziały 4, 5 i 10). Opis zamieszczony w rozdziale 1.3 opiera się o zupełnie dla mnie niejasny schemat strzałek, a na koniec trudno jest zrozumieć, jakie są przyczyny i jakie skutki tego oddziaływania. Chciałbym prosić o omówienie tego aspektu w czasie publicznej obrony.

Kolejny rozdział przedstawia bardzo krótkie, ale wyczerpujące omówienie działania sieci neuronowych oraz problemów związanych z klasyfikacją danych. Ten drugi aspekt pokazany jest na przykładzie bramki XOR, co jest bardzo użytecznym przykładem, gdyż taką bramkę Autor następnie realizuje w swoich badaniach opisanych w rozdziale 10. Trzecia część rozdziału, poświęcona optycznym realizacjom sieci neuronowych, pozostawia jednak niedosyt. Autor bardzo ogólnie opisuje potencjał takiego rozwiązania i hasłowo opisuje zrealizowane architektury. Szkoda, że w tym miejscu nie pojawiły się opisy doświadczeń wykorzystujących ekscytony polarytonowe, jak na przykład wyniki pracy [Ballarini *et al.* Nano Lett. **20**, 3506 (2020)], czyli ref. 141. Myślę, że takie wprowadzenie dałoby znacznie silniejszy grunt, na podstawie którego można by przedstawić własne wyniki. Pokazałoby to też czytelnikowi (nie-ekspertowi!), że praca ta nie odbywa się w próżni, ale w kompetytywnym środowisku naukowym rozsianym po całym świecie.

Rozdział 3 to opis próbek i “szczegółów doświadczalnych”. Próbkę są opisane dość wyczerpująco. Jestem ciekaw, jaki zakres odstrojeń ekscyton-mod wewnątrz jest dostępny w każdej z badanych próbek. Natomiast opis układów doświadczalnych jest zdecydowanie generyczny i nie przedstawia obiecanych “szczegółów”. Szczegóły są zamieszczone w kolejnych rozdziałach przy okazji omawiania konkretnych doświadczeń. Takie podejście jest niestandardowe, ale tutaj bardzo dobrze mogłoby się sprawdzić. Niestety, części szczegółów doświadczalnych brakuje także w tych opisach późniejszych. W jakich temperaturach przeprowadzono opisane doświadczenia?

Rozdziały prezentujące oryginalne wyniki Autora rozpoczynają się od wstępu, po którym następuje część zasadnicza, a na końcu jest podsumowanie. Wstępy mają przygotować czytelnika na to, o czym będzie mowa w rozdziale, a podsumowania zaprezentować wyniki z szerszej perspektywy. Podejście to działa dosyć dobrze, chociaż niekiedy wstępy generują pewną dezorientację. Na przykład, na początku rozdziału 4, na str. 17, Autor pisze, że “eliptycznie spolaryzowany kondensat półmagnetyczny” jest konsekwencją istnienia “czysto fotonicznego, syntetycznego, leżącego poza płaszczyzną pola magnetycznego oddziałującego na pseudospin polarytonu”. Na tym etapie lektury nie wiadomo absolutnie, o jakiej płaszczyźnie Autor pisze, ani nie został zdefiniowany ów pseudospin. Przykład ten dobrze obrazuje wysokopoziomową naturę języka rozprawy mgr. Mirka, który ociera się o środowiskowy slang. Innym ogólnym problemem prezentacji wyników doświadczalnych jest brak informacji o odstrojeniu w każdym konkretnym przypadku. Być może ekspert już na pierwszy rzut oka na dane byłby w stanie określić jego wartość, ale musiałby być to ekspert specjalizujący się w mikrownękach opartych o CdTe, a tych nie jest wielu. Brak informacji o odstrojeniu jest o tyle zaskakujący, że akurat wpływ odstrojenia na właściwości luminescencji polarytonów jest dość obszernie omówiony w rozdziale 1. Ponadto, podejrzewam, że obserwacja zjawisk, które Autor przedstawia w kolejnych rozdziałach, jest mocno

uwarunkowana wartością odstrojenia. Poproszę o komentarz na ten temat. Wyżej wymieniona “płaszczyzna” i “pseudospin” nie doczekują się zresztą definicji do samego końca rozprawy. Podobnie jest z innymi pojęciami, czy wielkościami jak np. px (str. 56), wir kwantowy i pół-wir kwantowy (rozdział 7), faza polarytonów (rozdział 8), parzystość modu (str. 43). Autor skąpi też informacji na temat procedur doświadczalnych oraz obróbki danych. Np. ciekawe i ważne byłoby dowiedzieć się, jak odbywa się klasyfikacja liniowa w realizacji opto-elektronicznej bramki XOR (rozdział 10.2). Autor pisze jedynie, że odbyła się ona przy użyciu komputera. Idea klasyfikacji liniowej opisana jest ogólnie w rozdziale 2, ale wydaje się, że droga między schematem z rys. 2.2 i analizą danych z rys. 10.4 jest dość długa i kręta. Brak tej informacji uniemożliwia ocenę wkładu Autora w tę część pracy. Ponadto, w wielu miejscach (np str. 21, 37, 72) Autor pisze o progu na kondensację (*condensation threshold*). Wartość energii impulsu odpowiadającej temu progowi jest istotna, gdyż Autor następnie rozróżnia pobudzanie poniżej i powyżej progu. Jednak jak widać na rysunku 9.3a, zmiana intensywności luminescencji w funkcji energii impulsu jest ciągła. Jak więc określana jest energia progowa? Inne przykłady niedookreślenia metody doświadczalnej i analizy danych przedstawię poniżej w dyskusji konkretnych rozdziałów.

W rozdziale 4, Autor opisuje wyniki badań nad polaryzacją spinową polarytonów w próbce z półmagnetycznymi studniami kwantowymi. Pokazuje jak polaryzacja ta zależy od pola magnetycznego i warunków pobudzania. Okazuje się, że powyżej progu na kondensację, sygnał luminescencji spolaryzowany jest kołowo nawet bez przyłożonego pola magnetycznego. Autor interpretuje to zjawisko wprowadzając pojęcie owego “czysto fotonicznego, syntetycznego, leżącego poza płaszczyzną pola magnetycznego”, o którym pisałem wyżej. Są to bardzo ciekawe wyniki, które mogłyby prowadzić do ekscytujących zastosowań (patrz np. [Zaumseil, Science **344** 702 (2014)]). Aby wyznaczyć wielkość tego pola, Autor posługuje się modelem opisanym w ref. [61]. Założenia tego modelu są jednak opisane tylko jednym zdaniem, więc trudno ocenić, na ile jego użycie jest uprawnione. Wydaje mi się, że model ten zakłada wytworzenie się polaronu magnetycznego w układzie polaryton-jony Mn^{2+} . Czy należy spodziewać się, że to założenie jest spełnione, jeśli stężenie jonów Mn^{2+} w studni wynosi tylko 0.5%? Zazwyczaj dla stężeń poniżej 10% prędkość relaksacji spinowej jonów Mn^{2+} jest zbyt wolna, aby wytworzył się porządek spinowy [Dietl *et al.* Phys. Rev. Lett. **74**, 474 (1995)]. Wyznaczona wartość syntetycznego pola magnetycznego wynosi 0.11 T (Tabela 4.1). Jakie są typowe wartości pól remanencji w kriostacie użytym do tych badań? Rozdział 4.3 jest zatytułowany “Źródło syntetycznego pola magnetycznego” (*Origin of synthetic magnetic field*), jednak zawiera głównie dyskusję statystyki orientacji polaryzacji emisji. Chciałbym prosić o zaproponowanie mikroskopowego mechanizmu odpowiedzialnego za wytworzenie spolaryzowanej luminescencji. W szczególności, poproszę o odpowiedź, jaka jest rola paramagnetycznych jonów. Czy obserwowane efekty nie mogą mieć źródła w eliptycznej polaryzacji wzbudzenia wywołanej użyciem obiektywu o wysokiej aperturze numerycznej i/lub dwójłomności luster Bragga, która dla określonych orientacji wzbudzenia wywoła następnie niezbalansowane populacje ekscytonów o spinach w dół i w górę (ref. [63]).

Rozdział 5 dotyczy badań pokazujących oddziaływanie między dwoma kondensatami zlokalizowanymi w osobnych minimach potencjału. Autor rozpoczyna od przedstawienia wyników bardzo prostego i ładnego doświadczenia, w którym mapuje fluktuacje energii polarytonów dla dodatniego i ujemnego odstrojenia (rys. 5.1). Energia dolnego polarytonu wykazuje większe fluktuacje tam, gdzie zawartość fotonu w funkcji falowej jest większa. Autor wnioskuje zatem, że fluktuacje pochodzą od niejednorodności potencjału fotonicznego. Wniosek ten wyciągnięty jest na podstawie porównania wyników dla tylko dwóch odstrojeń, jest więc trochę na wyrost. Szkoda, że doświadczenia tego nie powtórzono dla innych wartości odstrojeń. Niemniej jednak jest mi łatwo zaakceptować, że fluktuacje energii polarytonu pochodzą w głównej mierze od fluktuacji potencjału fotonicznego. W kolejnych częściach rozdziału Autor elegancko demonstruje przepływ polarytonów między kondensatami zlokalizowanymi w dwóch minimach potencjału. Bardzo ciekawe jest zachowanie kondensatów, kiedy oba minima są wzbudzane. Przepływ pomiędzy minimami generuje niemonotoniczne (a więc i nieliniowe) zależności intensywności luminescencji od mocy. Co jeszcze ciekawsze, Autor pokazuje, że kierunek przepływu można sterować mocą wzbudzenia: na skutek oddziaływań polaryton-polaryton możliwe jest sterowanie energią jednego kondensatu względem drugiego, a zatem także i wysokością bariery między nimi. Na podstawie map luminescencji dla przypadku pobudzania obu kondensatów Autor obserwuje dodatkowy sygnał luminescencji z obszaru pomiędzy nimi. Interpretuje je bez przytoczenia żadnej argumentacji (str. 42) jako interferencję “dwóch fal polarytonowych propagujących się pomiędzy kondensatami”. Poproszę o jakieś, najlepiej ilościowe, argumenty za tą tezą. Przepływ polarytonów jest też przekonująco zademonstrowany poprzez mapowanie luminescencji w przestrzeni odwrotnej. Autor obserwuje w tym wypadku interferencje (rys. 5.14) w energii powyżej energii kondensatu. Interpretuje je jako wynik oddziaływania dwóch przeciwbieżnych kondensatów. Również w tym przypadku interpretacja jest ogłoszona *ex cathedra* bez wskazania argumentów. Poproszę o interpretację wzoru interferencyjnego przedstawionego na rys. 5.14. Co to są za “wyższe stany wzbudzone” o których Autor pisze na str. 43? No i na jakiej próbce wykonano te badania i dla jakiego odstrojenia?

W kolejnym rozdziale Autor przedstawia metodę wytwarzania filarów przy użyciu zogniskowanej wiązki jonów oraz właściwości luminescencji tych struktur. Zaskakująco dużo miejsca poświęca Autor na opis metody wytwarzania filarów zwłaszcza w porównaniu ze skąpym opisem własnych doświadczeń spektroskopowych. Opis procedury trawienia jonowego będzie dobrym przewodnikiem dla przyszłych studentów. W kolejnej części rozdziału, Autor przedstawia wyniki mapowania dyspersji polarytonów w zależności od mocy pobudzania. Obserwowane dyspersje są nieciągłe co Autor interpretuje jako wynik “lokalizacji przestrzennej” (str. 53). Czy za tym terminem kryje się obserwacja modów fotonicznych filara takich jak np. w [Lohmeyer *et al.* Appl. Phys. Lett. **88**, 051101 (2006)]? Autor zauważa (str. 53), i pozostawia bez komentarza, że szerokość linii dla dolnego polarytonu jest aż czterokrotnie (!) mniejsza w przypadku filara niż dla struktur planarnych. Poproszę o chociaż spekulatywną interpretację tego zjawiska. Kolejna część rozdziału poświęcona jest na przekonujące przedstawienie, że również w wypadku struktur filarowych obecne jest syntetyczne pole magnetyczne prowadzące do kołowo spolaryzowanej emisji. Każe mi to przypuszczać, iż badania przedstawione w tym rozdziale wykonano na próbce MC-S.

Rozdział 7 poświęcony jest badaniom koherencji kondensatów. Schemat układu doświadczalnego (str. 59) jest niezgodny z jego opisem w tekście, ale nie przeszkadza to w zrozumieniu tego, jak działa eksperyment. Jasno jest opisana metoda analizy danych prowadząca do mapowania fazy w przestrzeni rzeczywistej. Niepotrzebne jest chyba wprowadzenie pojęć cyrkulacji fazy i ładunku topologicznego (str. 60), gdyż nie są one dyskutowane nie tylko dalej w tym rozdziale, ale w ogóle w rozprawie. Bardzo elegancko zademonstrowane jest wytwarzanie pół-wirów w półmagnetycznej mikrowęcce i przekonujący jest argument łączący odległość między nimi z ich stabilnością. Natomiast argument ten jest czysto fenomenologiczny: Autor nie wyjaśnia ani czym są wiry i pół-wiry, ani jaka fizyka za nimi stoi. Traktuje je jak byty absolutne, niezwiązane z żadną inną rzeczywistością. Poproszę o wyjaśnienie czym one są językiem zrozumiałym dla doktoranta pierwszego roku. Skąd bierze się charakterystyczny kształt dyslokacji w interferogramie na rys. 7.2a? Na jakiej próbce został zmierzony ten interferogram?

W rozdziale 8 mgr Mirek opisuje badania zmiany fazy emisji z kondensatu pod wpływem oddziaływania polaryton-polaryton. Na rys. 8.2 przedstawione są interferogramy w zależności od mocy pobudzania. Każdy z nich wygląda trochę inaczej, co w pierwszym odruchu interpretowałbym jako wynik niestabilności mechanicznych układu doświadczalnego. Autor zbyt szybko (str. 67) jednak wnioskuje, iż zmiany są wynikiem oddziaływań. Później jednak zauważa wpływ niestabilności układu i podejmuje drobiazgową — i tytaniczną — pracę oddzielenia obu wpływów. Wynik pokazany jest na rys. 8.5, koło którego w mojej wersji rozprawy widnieje duży wykrzyknik i wielki napis “dobre”. Analiza przedstawiona przez Autora przekonująco demonstruje wpływ oddziaływań i pokazuje jak można analizować chaotyczne z pozoru sygnały. Otwartym pozostaje pytanie, w jaki sposób oddziaływania wpływają na fazę kondensatu i dlaczego przejawia się to partykularną zależnością od mocy przedstawioną na rys. 8.5.

Rozdział 9 zawiera opis bardzo ciekawego doświadczenia, w którym Autor używa emisji z kondensatu w pętli sprzężenia zwrotnego do pobudzenia próbki. Uzyskuje w ten sposób delikatnie przesunięcie progu na kondensację w zależności od mocy wzbudzenia i, w konsekwencji, nieliniową zmianę sygnału różnicowego danego wzorem 9.1. Autor pokazuje następnie, jak ta zmiana zależy od opóźnienia między impulsem wzbudzającym, a sprzężonym zwrotnie impulsem emisji. Wyniki są zinterpretowane w oparciu o porównanie zależności czasowych sygnału różnicowego z czasami zaniku kondensatu. Te wartości są jednak nigdzie nie wymienione, więc bez przeczytania zacytowanej pracy [126] nie da się wyrobić sobie opinii na temat tej interpretacji. Ponadto, Autor twierdzi (str. 74), że przy zastosowaniu pętli sprzężenia zwrotnego, poniżej progu, sygnał luminescencji wzrasta dwukrotnie. Tymczasem sygnał różnicowy na rys. 9.4c sięga wartości 1, co według definicji oznacza, że luminescencja ze sprzężeniem jest nieskończenie silniejsza niż bez. Poproszę o wyjaśnienie.

Rozdział 10 zawiera opis działania bramki XOR opartej o oddziaływanie dwóch kondensatów i jej zastosowanie do rozpoznawania pisanych odręcznie cyfr. Jak pisałem powyżej, to

w moim przekonaniu największe osiągnięcie Autora i cieszę się, że zostało już docenione przez recenzentów i edytorów Nano Letters. Poproszę o wyjaśnienie, w jaki sposób zrealizowano multipleksowanie czasowe bramek, co wydaje mi się kluczowym zagadnieniem do realizacji sieci neuronowej, a zagadnienie to nie jest w ogóle omówione w rozprawie. Klasyfikacja liniowa została przeprowadzona na komputerze, ale w dalszej części rozdziału Autor demonstruje działania całkowicie optycznej bramki. Bardzo dokładnie, jak na standardy ustanowione w poprzednich rozdziałach, opisuje układ doświadczalny, a także krok po kroku prowadzi przez wyniki doświadczalne. Nie jest dla mnie jasne, do czego potrzebne jest spolaryzowane kołowo wzbudzenia i detekcja w tej samej polaryzacji. Czy Autor spodziewa się, że analogiczne działanie bramki można uzyskać na kondensatach opisanych w rozdziale 5? Czy to ta sama próbka?

W rozdziale 11 Autor demonstruje działanie bramki XOR realizowanej w oparciu o nieliniowości wygenerowane poprzez użycie impulsów wzbudzających o różnej mocy i przesuniętych w czasie między sobą. Bramki takie są następnie zastosowane do rozpoznawania mowy. Zważywszy na złożoność problemów, które Autor porusza, rozdział ten jest niezwykle krótki (7 i pół strony). Wyniki są więc opisane bardzo skrótowo, ogólnikowo i hasłowo, i nie-ekspert nie ma szans ani zrozumieć, ani docenić tej części pracy. Co gorsza, trudno nawet wejść w dyskusję na jej temat, gdyż nieznane są szczegóły doświadczenia. Na której próbce i dla jakiego odstrojenia wykonane są te pomiary? Autor rozpoczyna od przedstawienia, jak rozsuniecie czasowe i moc pobudzania wpływa na intensywność emisji. Pokazuje, że gdy emisja pobudzana dwoma impulsami przekrywającymi się czasowo, mamy do czynienia z nieliniowym jej wzmocnieniem. Jest to pokazane we wstawce do rys. 11.2, gdzie narysowana jest zależność intensywności emisji od opóźnienia między impulsami. (Wykres ten ma z niewyjaśnionego powodu odwróconą skalę czasu.) Myślę, że pożyteczne byłoby porównać ten przebieg z profilem czasowym emisji dla pobudzania pojedynczym impulsem, gdyż wydaje się, że oba przebiegi mają ten sam kształt, co sugeruje, iż odzwierciedlają ten sam mechanizm fizyczny. Autor twierdzi, iż dynamika opróżniania rezerwuaru ekscytonowego znajdującego się w stanach o wysokim wektorze falowym stoi za czasową zależnością wzmocnienia. Jeśli za dynamiką luminescencji pobudzanej pojedynczym impulsem stoi ten sam mechanizm, to oznacza że dynamika zaniku ze stanów z minimum dyspersji jest znacznie szybsza. Czy tak? Ponadto, w podobnych doświadczeniach z dwoma impulsami wzbudzającymi obserwowano czasowe wygaszanie luminescencji na skutek chwilowego ogrzewania rezerwuaru [Amo *et al.* Superlattices Microstruct. **43**, 449 (2008)]. Dlaczego ten efekt nie jest widoczny w doświadczeniach Autora? Po zademonstrowaniu tych ciekawych zjawisk, Autor przedstawia działanie bramki XOR. Ale bramka XOR działa w oparciu o inne zjawiska, związane ze relaksacją polarytonów zależną od spinu. Autor kompletnie pomija wszelkie aspekty związane z fizyką tych zjawisk i natychmiast przechodzi do przedstawienia parametrów bramki. Czy bramka XOR została zrealizowana na tej samej próbce i w tym samym odstrojeniu, co wyniki pokazane na rys. 11.2? Poproszę o przedstawienie przebiegów czasowych luminescencji, rozdzielonych polaryzacyjnie leżących u podstaw działania bramki i dyskusję mechanizmu stojącego za obniżoną intensywności luminescencji dla konfiguracji '11'.

Podsumowując, uważam że rozprawa doktorska pana mgr. Rafała Mirka opisuje niezwykle ciekawe, trudne i aktualne badania, którymi bez wątpienia zainteresuje się szerokie grono badaczy na całym świecie. Natomiast lektura samej rozprawy jest doświadczeniem nierzadko frustrującym, gdyż, moim zdaniem, napisana jest językiem zbyt hermetycznym. Autor też oszczędnie dzieli się szczegółami doświadczeń, a ich wyniki często interpretuje bez przywołania żadnej argumentacji. Z lektury rozprawy pana mgr. Mirka trudno jest nauczyć się czegoś o fizyce oddziałujących kondensatów polarytonowych. W rezultacie, w trakcie lektury czytelnik perwersyjnie oscyluje pomiędzy uczuciem zachwytu a dezorientacją. Niemniej jednak rozprawa spełnia formalne i zwyczajowe wymagania stawiane takim pracom. Pan mgr Rafał Mirek wykazał się wiedzą w swojej dziedzinie i umiejętnością prowadzenia badań, a przedstawione wyniki stanowią niewątpliwie oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Wnioskuje zatem o dopuszczenie Autora do dalszych etapów postępowania.



Łukasz Kłopotowski