



Wrocław, 14 Listopad 2023 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Karoliny Łempickiej-Mirek
z tytułem *Polarytony ekscytonowe w mikrownękach optycznych z
perowskitami***

Streszczenie recenzji i jej główne konkluzje

Praca doktorska Pani mgr Karoliny Łempickiej-Mirek dotyczy wytwarzania i zbadania materiałów perowskitowych w perspektywie ich integracji w strukturę wewnętrzną optyczną oraz obserwacji formowania się polarytonów ekscytonowych w reżimie silnego sprzężenia światła z materią oraz generacji nierównowagowego kondensatu polarytonów ekscytonowych w temperaturze pokojowej.

Rozprawa jest obszerna, składa się z 8 rozdziałów, spisanych na 214 stronach formatu A4, zamieszczono w niej 177 rysunków i 275 przypisów literaturowych. Każdy z rozdziałów zawiera syntezę zawartości. Na końcu pracy autorka przedstawia podsumowanie najważniejszych osiągnięć w toku realizacji pracy.

Pomimo obszerności, pracę czyta się bardzo dobrze. Jest napisana językiem zrozumiałym z niewielką ilością sformułowań budzących kontrowersje. Praca pozwala czytelnikowi zanurzyć się w świat różnego typu perowskitów zaczynając od metod ich syntezy po strukturalną charakteryzację materiału różnymi technikami, przede wszystkim technikami spektroskopii optycznej, poznać optyczne właściwości perowskitów, kończąc na ich specyficznych zastosowaniach. W szczególności autorka pokazuje możliwość integracji różnego typu perowskitów z optycznymi wnękami rezonansowymi celem demonstracji wydajnych emiterów światła bazujących na silnym sprzężeniu światła z materią. Przy czym, sprzężenie to możliwe jest do obserwacji w temperaturze pokojowej, dzięki wysokiej energii wiązania pary elektronu i dziury.

Podjęte w toku realizacji pracy problemy badawcze zawarte są w jednym z głównym nurtów badań obecnych w światowej fizyce i chemii, są zdecydowanie na czasie. Rezultaty pracy mogą wnieść istotną wiedzę odnośnie syntezy i zastosowań perowskitów w szeroko-rozumianej fotonice i poza nią. W mojej ocenie, do najważniejszych wyników pracy należą:

1. Demonstracja syntezy materiałów perowskitowych, w tym, po raz pierwszy wykonana synteza perowskitu PEPI z jonami manganu w wysokiej koncentracji (Rozdz. 2.4 i 2.5);
2. Demonstracja strojenia silnego sprzężenia w temperaturze pokojowej we wnękach z perowskitem PEPI kontrolowanych piezoelementem (Rozdz. 3.2.1, 3.3.1);
3. Po raz pierwszy obserwacja polarytonów ekscytonowych w mikrownękach z polikrystalicznymi perowskitami BAPI i OCT (Rozdz. 3.2.2.);
4. Po raz pierwszy demonstracja i charakteryzacja zawieszonych ultracienkich warstw poliimidowych z dwuwymiarowym perowskitem,



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



implementacja struktury w mikrownęce optycznej i demonstracja silnego sprzężenia w temperaturze pokojowej (Rozdz. 4);

5. Po raz pierwszy, obserwacja rozszczepienia Zeemana zależnej od koncentracji jonów manganu w polikrystalicznym perowskicie Mn:PEPI (Rozdz. 5.7);

6. Pokazane kontrolowanego zjawiska otwierania się przerwy w reżimie sprzężenia spinowo-orbitalnego typu Rashba-Dresselhaus obserwowanego na dyspersjach polarytonów fotonicznych (Rozdz.6);

7. Zaprezentowano możliwość generacji i kontroli geometrycznych krzywizn Berry'ego dla dyspersji polarytonów fotonicznych bez potrzeby przyłożenia zewnętrznego pola magnetycznego lub temperatury, otwierając perspektywy dla badań nad wykorzystaniem topologii układów fotonicznych do zastosowań w spintronice (Rozdz. 6.11);

8. Generacje chiralnego światła laserowego z kontrolą elektryczną w mikrownękach optycznych z nieorganicznym monokryształem perowskitu CsPbBr₃ oraz nematycznym ciekłym kryształem (Rozdz.7);

O znaczeniu pracy badawczej autorki świadczą publikacje wybranych wyników w renomowanych recenzowanych międzynarodowych czasopismach naukowych:

K. Łempicka-Mirek, M. Król, H. Sigurdsson, A. Wincukiewicz, P. Morawiak, R. Mazur, M. Muszyński, W. Piecek, P. Kula, T. Stefaniuk, M. Kamińska, L. De Marco, P. G. Lagoudakis, D. Ballarini, D. Sanvitto, J. Szczytko, B. Piętka, [Electrically tunable Berry curvature and strong light-matter coupling in liquid crystal microcavities with 2D perovskite](#), **Science Advances** **8**, 40 (2022);

M. Król, **K. Łempicka-Mirek**, K. Rechcińska, M. Furman, K. Nogajewski, R. Mazur, P. Morawiak, W. Piecek, W. Pacuski, J. Szczytko, B. Piętka, [Universality of open microcavities for strong light-matter coupling](#), **Optical Materials Express** (2023);

jednej pracy w materiałach konferencyjnych:

K. Łempicka, M. Furman, M. Muszyński, M. Król, A. Wincukiewicz, K. Rechcińska, R. Mazur, W. Piecek, M. Kamińska, J. Szczytko, B. Piętka Exciton-Polaritons in a Tunable Microcavity with 2D-Perovskite, International Photonics and OptoElectronics Meeting 2019 (OFDA, OEDI, ISST, PE, LST, TSA) (2019);

Jednej pracy opublikowanej w otwartych zasobach internetowych w serwisie arXiv, co prawdopodobnie związane jest z trwającym procesem recenzji w czasopiśmie naukowym:

K. Łempicka-Mirek, M. Król, L. De Marco, A. Coriolano, L. Polimeno, I. Viola, M. Kędziora, M. Muszyński, P. Morawiak, R. Mazur, P. Kula, W. Piecek, P. Fita, D.



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



Sanvitto, J. Szczytko, B. Piętka, [Electrical switching of a chiral lasing from polariton condensate in a Rashba-Dresselhaus regime](#), [arXiv 2211.11852 \(2022\)](#);

Jednej pracy przygotowywanej do druku:

K. Łempicka-Mirek, M. Król, R. Mazur, W. Piecek, J. Szczytko, P.W. Majewski, B. Piętka, [Free-standing ultrathin films of two-dimensional perovskite for light-emitting devices operating at strong coupling regime](#), (przygotowywana do druku) (2023);

W mojej opinii rozprawa prezentuje wiedzę teoretyczną kandydatki na wysokim poziomie w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne oraz wykraczając poza tę dyscyplinę, m. in. wchodząc w zakres nauk chemicznych, a także innych dziedzin i dyscyplin. Autorka w wysokim stopniu opanowała wiedzę dotyczącą syntezy materiałów perowskitowych z prekursorów chemicznych, budowy krystalicznej tychże, standardowe i zaawansowane spektroskopowe metody charakteryzacji (fotoluminescencja, odbicie, obrazowanie przestrzeni wektora falowego), metody charakteryzacji strukturalnej, fizykę rezonatorów optycznych, fizykę sprzężenia światła z materią. W mojej ocenie Kandydatka ma umiejętności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiot rozprawy stanowi oryginalny wkład kandydatki w obszar badań nad silnym sprzężeniem światła z materią w mikrorezonatorach optycznych zawierających materiał perowskitowy. Tematyka ta wpisuje się w obecnie eksplorowane trendy badawcze na świecie, w których materiały perowskitowe pełnią szczególną rolę ze względu na ich właściwości fizyko-chemiczne. Wyniki badań kandydatki 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 pracę kandydatki i wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Szczegółowa recenzja, pytania i uwagi do pracy

Struktura pracy i zawartość rozdziałów

W rozdziale 1 pracy następuje wprowadzenie w perowskity, ich rodzaje i właściwości. Czytelnik zaznajomiony zostaje z mikrowną optyczną i jej parametrami. Następnie zaprezentowany jest reżim silnego-sprężenia światła z materią w mikrownie optycznej i konsekwencje silnego oddziaływania w postaci powstania gałęzi polarytonowych wraz z ich charakterystyką. W kolejnych podrozdziałach zaprezentowane są właściwości światła propagującego w mikrownie ciekłokrystalicznej, opisany układ do obrazowania przestrzeni wektora falowego oraz czym jest kondensacja polarytonów ekscytonowych.



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



W **rozdziale 2** opisany jest sposób przygotowania próbek z różnymi typami perowskitów. W klarowny sposób opisane zostały procedury związane z przygotowaniem podłoża oraz warunkami syntezy badanych materiałów wraz z ich wstępną charakteryzacją. Rozdział ten jest bardzo interesujący i rzeczowy, dobrze przygotowany, z dużą ilością detali, czyta się go z przyjemnością mimo jego obszerności. Świadczy to o ogromnym zaangażowaniu Pani Karoliny Łempickiej-Mirek w proces syntezy materiałów będących podstawą późniejszych działań badawczych i potwierdza bezsprzeczny wkład Pani Karoliny w powstanie późniejszych wyników eksperymentalnych. Ten rozdział uznaję za bardzo ważny. W zasadzie stał się fundamentem doktoratu, gdyż bez opanowania syntezy perowskitów utrudniona byłaby realizacja badań nad polarytonami ekscytonowymi z wykorzystaniem tychże materiałów.

W **rozdziale 3** przedstawiony został układ eksperymentalny do pomiaru parametrów optycznych wnek z polarytonami ekscytonowymi (struktura modów wneki, dyspersja kątowna emisji, zależność dyspersji kątownej od odstrojenia). W tym celu materiał perowskitowy umieszczony był w mikrownęce swobodnie strojonej z wykorzystaniem elementu piezoelektrycznego. Ta koncepcja badawcza jest bardzo ciekawa, gdyż umożliwia sterowanie strojeniem modu wneki i emisji ekscytynu w perowskicie bez potrzeby wykonywania za każdym razem nowej struktury wneki z ustalonym odstrojeniem. Rozdział ten w dalszej części zawiera kolejno wyniki charakterystyki wnek z materiałem perowskitowym PEPI, oraz BAPI i OCT. W obydwu przypadkach dało się znaleźć cechy spektralne świadczące o obecności polarytonów ekscytonowych we wnece w temperaturze pokojowej. W dalszej części rozdziału przedstawione są wyniki eksperymentów optycznych na monokryształach perowskitów wykrystalizowanych na szkle, w tym kolejno PEPI, mikrodruty PEPI-F, PEPI z jonami manganu, perowskitu hybrydowego $(\text{DA})_2(\text{MA})_n-1\text{PbI}_{3n+}$. Tu na uwagę zasługuje pokazanie po raz pierwszy widma emisji i odbicia rozdzielonych kątowno dla zupełnie nowego materiału jakim jest Mn:PEPI, który został zsyntezowany przez autorkę pod kierunkiem badacza z Włoch. W dalszej części rozdziału 3 przedstawiono wyniki eksperymentalne dot. obserwacji silnego sprzężenia w mikrownękach ze strukturyzowanym perowskitem PEPI-F, charakteryzującym się silną dwójłomnością, która przekłada się na obserwacji separacji modów polarytonowych TE i TM w rezonatorze. Dodatkowo struktury z PEPI-F posiadają miejsca zlokalizowane przestrzennie, w których można obserwować kwantyzację modów. Wreszcie w kolejnym akapicie przedstawiona jest kondensacja polarytonów ekscytonowych w perowskicie nieorganicznym CsPbBr_3 w temperaturze pokojowej, dzięki dużej energii wiązania ekscytonów, sięgającej 40 meV. Dodatkowo, po raz pierwszy w temperaturze pokojowej zaprezentowano zjawisko konkurencyjności modów polarytonowych związanych z dwójłomnością CsPbBr_3 .

W **rozdziale 4** zaprezentowano technikę wytwarzania ultracienkich i elastycznych folii poliamidowych z dwuwymiarowych perowskitów PEPI a



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



następnie przedstawiono optyczną charakteryzację perowskitów PEPI na błonie poliimidowej i bez, poznając dogłębnie charakterystykę emisji i absorpcji w tychże materiałach w funkcji mocy pompowania optycznego i temperatury. Następnie przedstawiono optyczne właściwości PEPI na poliimidge zamkniętej w mikrownęce optycznej.

W **rozdziale 5** przedstawiono właściwości optyczne i strukturalne polikrystalicznych perowskitów PEPI domieszkowanych manganem w tym zaprezentowano wyniki starzeniowe materiału oraz fotostabilność. Następnie zaprezentowano właściwości fotoluminescencji PEPI z manganem w tym wyznaczono efektywny g-czynnik rozszczepienia dla ekscytonu X1. Wreszcie, w końcowej części rozdziału, omawiane są polarytony ekscytonowe powstałe w sprzężeniu ekscytonów w Mn:PEPI o koncentracji manganu 1% do modów strojonej wnęki rezonansowej w temperaturze kriogenicznej.

W **rozdziale 6** zaprezentowano sposób wykonania i właściwości wnęk wypełnionych nematycznym ciekłym kryształem oraz posiadających warstwę aktywną z dwuwymiarowego perowskitu hybrydowego PEPI syntezowaną przez autorkę pracy. W dalszej części autorka wprowadza do dyspersji modów fotonowych we wnęcie z ciekłym kryształem nematycznym pokazując generowaną dyspersję modów wnęki wynikającą z orientacji molekuł kryształu (oddziaływanie Rashba-Dresselhaus) oraz jak może wyglądać rezultat sprzężenia światło-materia we wnęcie wypełnionej ciekłym kryształem oraz materiałem aktywnym w reżimie Rashba-Dresselhaus. W dalszej części tego rozdziału, autorka przedstawia układ doświadczalny pozwalający na określenie parametrów optycznych prezentowanych wnęk w temperaturze pokojowej by w konsekwencji przejść do wyników przeprowadzonych w tym układzie doświadczeń.

W **rozdziale 7**, we wstępie przybliżono ideę wnęki lasera z ciekłym kryształem i sposób sterowania modami w reżimie Rashba-Dresselhaus za pomocą kontroli orientacji molekuł w ciekłym kryształe. W dalszej części omówiono układ doświadczalny w którym badano skonstruowane wnęki z monokryształem perowskitu nieorganicznego CsPbBr₃, aby później zademonstrować za pomocą tego układu istnienie silnego sprzężenia modu wnęki z ekscytonem w perowskicie oraz kondensacji polarytonów ekscytonowych. Zademonstrowano, że kondensacja może być kontrolowana przez napięcie przykładane do wnęki i strojenie i odstrojenie względem siebie odpowiednich modów wnęki co powoduje pojawienie się i zanikanie emisji kondensatu. Wreszcie na końcu rozdziału, zaprezentowano kondensację polarytonową w modzie Rashba-Dresselhaus odpowiedzialną za emisję chiralną energetycznie zdegenerowanych kondensatów spolaryzowanych kołowo.

Pytania do pracy

1. Chyba w całej pracy, autorka nie zdefiniowała czym jest ekscyton, dlaczego zostało to pominięte, skoro stanowi kluczowy aspekt w realizacji pracy?



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



Istnienie ekscytonów jest niezbędne dla obserwacji polarytonów ekscytonowych;

2. W rozdz. 2.2, przedstawiono metody otrzymywania różnych typów perowskitów. W szczególności w rozdz. 2.2.2 przedstawiono syntezę perowskitu BAPI. Wspomniano, że BAPI rozprowadzono za pomocą powlekania obrotowego na szkło i na lustrze dielektrycznym. Czy są różnice w morfologii BAPI w tych dwóch różnych przypadkach przy zastosowaniu tego samego rozpuszczalnika? Czy podłoże gra istotną rolę w procesie powlekania obrotowego? Czy prowadzono eksperymenty w kierunku starzenia materiału BAPI?
3. Jak bardzo zależy od położenia na próbce energia odstrojenia modu wnęki od energii ekscytony w materiale przy ustalonym napięciu na piezoelemencie. Jak bardzo jednolite są struktury względem tychże parametrów (mod wnęki, energia ekscytonu), czy to jest skala mikrometrów, a może milimetrów? Jak duża jest równoległość luster dielektrycznych i czy uzyskanie tej równoległości miało znaczenie? Czy możliwe są do wytworzenia wnęki z klinem, pozwalające na płynne, przestrzenne sterowanie modem wnęki?
4. W rozdz.3.3.1, stron. 69, akapit pierwszy, autorka napisała: „Wiele warstw organiczno-nieorganicznych tworzy rezonator Fabry’ego-Perota, w którym to dochodzi do silnego oddziaływania ekscytonów perowskitu ze światłem, tworząc mody polarytonowe wewnątrz struktury kryształu.” W tym wypadku monokryształ PEPI umieszczony był na podłożu szklanym i nie przykryty górną powłoką. Oznacza to, że rezonator był stworzony przez odbicie światła od półpłaszczyzny dielektrycznej szkło/perowskit, ewentualnie powietrze szkło oraz perowskit powietrze. Materiał perowskitu wypełnia tylko wnękę ale raczej jej nie tworzy w w/w znaczeniu. Jak autorka może to skomentować?
5. Czym spowodowana jest kwantyzacja modów i tworzenie parabolicznego potencjału wiążącego dla spółapkowanych polarytonów ekscytonowych? Czy jest to związane tylko z geometrią przewężenia?
6. Jaka jest stabilność w czasie parametrów emisji kondensatu polarytonów ekscytonowych w mikrownękach z CsPbBr₃?
7. W rozdziale 4 zaprezentowano wyniki eksperymentu fotoluminescencji i odbicia w temperaturze pokojowej dla dwuwymiarowego perowskitu PEPI na folii poliimidowej położonych na lustrze dielektrycznym oraz samego dwuwymiarowego PEPI na lustrze. Pokazano, blisko dwukrotne gaśnięcie fotoluminescencji z PEPI na folii poliimidowej, dlaczego? Czy jest to problem związany z niespasywowaną międzypowierzchnią między PEPI and poliimidem?
8. Czym spowodowany jest gwałtowny przeskok w szerokości linii dla perowskitu PEPI w temperaturze ok. 90 K? Pytanie inspirowane wynikami eksperymentów w Rozdz.4.4, Rys. 4.10 (c).
9. Czy przesunięcie Stoksa między emisją i absorpcją dla dwuwymiarowego perowskitu PEPI bez lub na błonie poliimidowej zaprezentowane w Rozdziale



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



4.3 jest związane z naprężeniami wynikającymi z różnych rozszerzalności temperaturowych nośników perowskitu i samego perowskitu?

10. Jaka jest przyczyna znaczącej różnicy w progu mocy pompowania wnęki dla efektu oddalania się modów spolaryzowanych liniowo horyzontalnie i wertykalnie dla wnęki z samym ciekłym kryształem oraz dla wnęki z ciekłym kryształem wraz z perowskitem? Pytanie zainspirowane Rys. 6.23k oraz Rys. 6.24c. Ta różnica wynosi blisko dwa rzędy.

Uwagi i pozostałe pytania i komentarze do pracy:

1. W rozdz. 1.2, str.6 „Mikrownęka optyczna ... Składa się zazwyczaj z dwóch zwierciadeł Bragga ... Czy rezonator optyczny zazwyczaj może się składać z dwóch zwierciadeł Bragga? W konstrukcji laserów gazowych, laserów na ciele stałym, czy nawet półprzewodnikowych laserów krawędziowych, nie jest konieczne użycie zwierciadeł Bragga. Jakie na ten temat zdanie ma autorka tekstu?
2. W rozdziale 1.2, str. 7 można przeczytać „Najpopularniejszym rodzajem wnęki optycznej jest rezonator typu Fabry-Pérot...” Innym przykładem są periodyczne struktury dielektryczne, takie jak dwuwymiarowe kryształy fotoniczne, i jak wspomniane wcześniej zwierciadła Bragga.” Zdania te są chyba niefortunnie sformułowane, gdyż zwierciadła Bragga nie są przykładem wnęki optycznej, ale zespół odpowiednio zdefiniowanych względem siebie zwierciadeł Bragga już może być takim rezonatorem;
3. W rozdz. 1.2, str.8 można przeczytać: „Im wyższa jest wartość dobroci wnęki, tym czas życia uwięzionego fotonu jest większy, ponieważ światło wewnątrz struktury więcej razy się odbija.” W mojej opinii można to stwierdzenie sformułować w inny sposób: „Im wyższa jest wartość dobroci wnęki, tym czas życia uwięzionego fotonu jest większy, ponieważ światło jest dłużej uwięzione wewnątrz struktury.” Aczkolwiek oryginalne zdanie jest prawdziwe, w mojej opinii delikatnie niefortunne;
4. W rozdz. 1.2, str.8 napisane jest: „Docelowo dąży się do uzyskania struktur o dobroci wnęki sięgającej kilku tysięcy i większej [53].” Dobroć wnęki będzie definiowana przez docelowe zastosowania. Nie zawsze wysoka dobroć wnęki jest wymagana. Przykładem są źródła fotonów o nanometrowej skali i dużej szerokości linii, które wymagają sprzęgnięcia do wymaganego modu wnęki. Jeśli mod wnęki będzie zbyt szeroki spektralnie (duże Q) względem szerokości spektralnej emitera, to uzyskania sprzężenia może być mniej efektywne. Autorka wymienia lasery typu VCSEL jako przykład układów ze słabą wnęką. Duże Q jest poszukiwane dla np. laserów o bardzo wąskiej linii spektralnej oraz w badaniach nad silnym sprzężeniem światła z materią.
5. W rozdz. 1.3, str. 9, napisane jest „Uwięziony foton we wnęce stale wymienia energię z parami elektron-dziura (wzbudzony elektron przez foton znajduje się w paśmie przewodnictwa, a dziura w paśmie walencyjnym)....”. W późniejszym zdaniu pojawia się ekscyton. Wydaje mi się, że ekscyton



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



powinien być zdefiniowany w zdaniu wcześniej jako kulombowsko-skorelowana para rzeczonego elektronu i dziury.

6. W równaniu 1.7 brak jest w tekście opisującym zdefiniowanego wektora falowego w płaszczyźnie studni $k_{||}$.
7. W jaki sposób określano grubość warstw na podłożu perowskitów opisywanych w rozdz. 2.2? Czy grubość warstwy określona była za pomocą interpretacji położenia energetycznego pików emisji, czy też w inny sposób? Jaki?
8. Czy istnieje różnica w jakości materiału perowskitowego po oczyszczeniu podłoża w płazmie trenowej lub roztworem typu PIRANIA?
9. Jak skaluje się pozycja energetyczna pików emisji perowskitu $(\text{DA})_2(\text{MA})_{n-1}\text{PbI}_{3n+1}$ z wartością n . Czy ten proces jest określony jakąś zależnością funkcyjną? Z punktu widzenia inżynierii przerwy energetycznej tychże materiałów, wydaje się to być ciekawym zagadnieniem. Pytanie jest zainspirowane rysunkiem 2.30 znajdującym się w rozdz. 2.7, str. 55. Rysunek pokazujący zmianę pozycji pików emisji w funkcji parametry n , czy da się przedstawić taki rysunek dla zależności długości fali pików emisji w funkcji parametry n ? Podobnie, uwagę zwraca Tabela 2.3 na str. 57. [zobaczyć prace 158].
10. W rozdz. 3.2 strona 60, koniec pierwszego akapitu, użyte zostało następujące sformułowanie „Dodatkowo, takie rozwiązanie pozwala uniknąć degradacji kryształów perowskitu spowodowanej wzrostem górnego zwierciadła.”. Wydaje mi się, że to zdanie nie jest precyzyjnie użyte, brakuje tu kontekstu. Rozumie, że chodziło autorce o przypadek wzrostu górnego zwierciadła w procesie epitaksjalnym, który dla nieorganicznych związków typu TiO_2 lub SiO_2 wymaga podwyższonej temperatury, co tym samym mogłoby spowodować degradację materiały aktywnego (perowskitu). Czy tak?
11. W rozdz. 3.2.1, pierwszy akapit, użyte zostało sformułowania „...zamknięto w strukturze mikrowłęki dielektrycznej składającej się z dwóch zwierciadeł dielektrycznych z maksymalnym współczynnikiem odbicia na 520 nm”. W mojej opinii to sformułowanie nie jest precyzyjne. Rozumie, iż mowa jest o centralnej długości fali pasma wzbronionego dla zwierciadła, którą autorka zdefiniowała w rozdziale 1.2 jako ang. stopband. Czy tak?
12. Czy eksperyment odbicia od mikrowłęki z wynikami zaprezentowanymi na Rys. 3.3 był przeprowadzony w temperaturze pokojowej? Brakuje tej informacji na rysunku.
13. Na Rys. 3.4 a-e widoczne są pewne drobne „zmarszczki” tła. Czy autorka zastanawiała się nad ich pochodzeniem? Dodatkowe interferencje światła białego?
14. W rozdz. 3.2.1, str. 65, autorka używa następującego sformułowania „Zbyt mocne mechaniczne przykręcenie obu lusterek powoduje, że przestrzeń powietrza pomiędzy perowskitem a drugim zwierciadłem dielektrycznym jest niewielka, a tym samym zakres strojenia napięciem piezoelektrycznym jest



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

dzienan.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



ograniczony. W miarę zwiększania się napięcia piezoelektrycznego ...". Użycie stwierdzenia o napięciu piezoelektrycznym w tym przypadku jest niewłaściwe. Napięcie piezoelektryczne jest generowane przez materiał piezoelektryczny pod wpływem przyłożenia siły do tego materiału. W tym przypadku autorka stroi mikrarezonator przez przyłożenie napięcia do elementu piezoelektrycznego powodując odkształcenie tego elementu. W tym samym akapicie, kilka zdań dalej, autorka poprawnie definiuje skutki przyłożenia napięcia do elementu piezoelektrycznego.

15. W rozdz. 3.4.1, str. 76, ostatni akapit, można znaleźć następujące stwierdzenie „Odszukano numerycznie położenia maksimów pików – stanów skwantowanych (na rysunku 3.17b oznaczone niebieskimi krzyżykami),...”. Niestety jakoś rysunku 3.17b nie pozwala znaleźć rzeczonych krzyżyków.
16. W rozdz. 3.4.1, str. 76, ostatni akapit, można znaleźć następujące stwierdzenie „Jeżeli stany skwantowane są równo oddalone od siebie (energetycznie), to wtedy układ posiada potencjał kwadratowy (paraboliczny)”. Wydaje mi się, że powinno zostać tylko stwierdzenie potencjału parabolicznego, nie „kwadratowego”, gdyż użycie terminu potencjału kwadratowego może być mylące, np. z potencjałem klasycznej studni kwantowej. Natomiast wniosek jest słuszny, iż stany związane w potencjale parabolicznym są równo-odległe energetycznie.
17. W rozdz. 3.5, str. 78, widnieje Rys. 3.19 (m). Skala mocy pobudzania wygląda dziwnie, nie widać podziałki na osi „Mocy pobudzania”. Czy dobrze można zrozumieć, że ta skala jest logarytmiczna?
18. W rozdz. 4.3, str. 89, drugi akapit, widnieje następujące stwierdzenie „...stamtąd przechodziła przez obiekt o odległości roboczej $NA=0,75$...”. Odległość robocza obiektu jest czym innym niż jego apertura numeryczna. Tu NA zdaje się być skrótem od ang. numerical aperture.
19. W rozdz. 5.7 istnieją rysunki 5.17 oraz 5.18. Niestety nie mogłem znaleźć informacji, dla jakich przejść optycznych wyznaczona została energia rozszczepienia Zeemana, ani też dla jakich przejść ekscytonowych wyznaczono efektywny g-czynnik. Można się jedynie domyślać, że chodzi tu o ekscyton X1.
20. Autorka w wielu miejscach w opisie układów eksperymentalnych powtarza, że w eksperymencie użyty był spektrometr firmy Andor. Uważam, że ta informacja niewiele wnosi, dlatego że firma ta produkuje wiele konfiguracji spektrometrów. Bardziej pouczające byłoby wymienienie parametrów spektrometru takich jak jego długość robocza, zastosowane siatki dyfrakcyjne, parametry zastosowanych siatek dyfrakcyjnych (np. długość fali fotonów dla których siatki osiągają maksimum wydajności dyfrakcji, czyli tzw. Blaze, ilość linii na mm dla siatki, jeśli dotyczy, apertura numeryczna), czy rozdzielczość.
21. W odniesieniu do komentarza 20. Autorka również wymienia, iż w układzie spektrometru (monochromator+kamera CCD) zastosowano kamerę CCD. Również i tu podanie parametrów kamery lub jej dokładnej nazwy dawałoby



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



więcej informacji dla czytelnika, np. w związku z chęcią odtworzenia eksperymentu.

22. Na Rys. 6.6c,d, str. 131. Przedstawiono dyspersje modów wnęki z ciekłym kryształem bez obecności perowskitu i z zerowym przyłożonym napięciem porządkującym. Dyspersja modów wnęki jest słabo widoczna, manipulacja skalą kolorów pomogłaby w lepszej prezentacji tychże, w szczególności dla dużych wartości kątów, aby zilustrować różnice w krzywiznie dyspersji dla polarytonów i modów wnęki. Być może skala logarytmiczna dla intensywności sygnału jak na Rys. 6.7 mogłaby pomóc w lepszej wizualizacji;
23. W Rozdz. 6.5, str. 134, autorka użyła stwierdzenia „Mody polarytonowe badanego miejsca z rysunku 6.9b,c są wąskie ...”. Co to znaczy, że mody są wysokie?
24. W Rozdz. 6.5, str. 134, w podpisie Rys. 6.9 użyto stwierdzenia „symulacje Berremana”. Podstaw tego typu symulacji nie przedstawiono w pracy, wydaje się być zasadnym podanie odnośnika literaturowego; Tym bardziej, że w późniejszym tekście taki odnośnik istnieje [257];
25. W Rozdz. 6.5, str. 135, pierwszy paragraf na stronie; autorka napisała „Rozwiązania te wykreślono liniami ciągłymi (kolorem zielonym - H i kolorem fioletowym - V) na rysunku 6.9b,c. Relacje dyspersji niesprzężonych modów fotonowych EphH,V zaznaczono na tych samych rysunkach 6.9b,c białymi przerywanymi liniami.” Niestety na Rysunku bardzo trudno rozpoznać rzeczone linie, być może z powodu jakości wyświetlanego dokumentu PDF lub też z powodu tego, że tych linii tam nie ma lub są istniejąco słabo widoczne;
26. Dotyczy: Rys. 6.23 na str. 147, Rys. 6.25 na str. 149, Rys. 6.28 na str. 152, Rys. 6.32 na str. 155, Rys.6.33 na str. 156, Rys.7.5 na str. 168, Rys. 7.7 na str.170, Rys. 7.8 na str. 171, Rys. 7.9 na str. 171, Rys. 7.10 na str. 173. Niestety czcionka w legendzie dla skali intensywności na Rys. 6.23 a-d, Rys. 6.23 e-h, Rys. 6.25a-d, Rys. 6.25e-h, Rys. 6.28, 6.32a,b,d,e,g,h, Rys. 6.33m Rys. 7.5, Rys. 7.7b-e, Rys. 7.8a-b, Rys. 7.9a-d, Rys. 7.10 jest niemożliwa do odczytania, podobnie czcionka w legendach na Rys. 6.23i,j,k oraz 6.25i,j,k;



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

Drobne błędy w pracy:

- str. 6, akapit 3, rozdział 1.1: zamiast „...zerowymiarwe formy (0D)” powinno być „...zerowymiarowe formy (0D) „;
- str. 6, akapit 4, rozdział 1.1: zamiast „...ich własności emisyjne”, powinno być „...ich właściwości emisyjne”;
- str. 96, akapit 1, rozdział 4.3: zamiast „...w zachowaniu pierwotnych **własności** perowskitu ...”, powinno być „...w zachowaniu pierwotnych **właściwości** perowskitu ...”;
- Rozdz. 4.3, str. 96, akapit 2 na tej stronie: zamiast „Dokładne położenia minimów przedstawia rysunek **4.11b**” powinno być „Dokładne położenia minimów przedstawia rysunek **4.11c**”;



- Rozdz. 4.3, str. 96, akapit 2 na tej stronie: zamiast „Położenia minimów dokładniej są przedstawione na rysunku 4.7d.”, powinno być „Położenia minimów dokładniej są przedstawione na rysunku 4.1d.”;
- Rozdz. 5.1, str. 102, akapit pierwszy, zamiast „przełączanie magnetyzmu przez pole zewnętrzne pole elektryczne”, powinno być „przełączanie magnetyzmu przez ~~po~~le zewnętrzne pole elektryczne”;
- Rozdz. 5.1, str. 103, ostatni akapit rozdziału; zamiast „...a dodanie warstwy ~~ochronne~~ PMMA”, powinno być „...a dodanie warstwy ~~ochronnej~~ PMMA”;
- Rozdz. 5.5, str. 110, pierwszy akapit rozdziału; zamiast „...do temperatury 4,5 K, widma fotoluminescencji badanych materiałów różniły się od siebie. Rysunek 5.8a przedstawia unormowane widma emisji perowskitu PEPI o różnej zawartości manganu”, powinno być „...do temperatury 4,5 K, widma fotoluminescencji badanych materiałów różniły się od siebie. Rysunek 5.9a przedstawia unormowane widma emisji perowskitu PEPI o różnej zawartości manganu”, oraz zamiast „Zestawienie dokładnych położenia linii ekscytonowych w 4,5 K zaprezentowane zostało na rysunkach 5.8b,c” powinno być „Zestawienie dokładnych położenia linii ekscytonowych w 4,5 K zaprezentowane zostało na rysunkach 5.9b,c”;
- Rozdz. 5.7, str. 116, pierwszy akapit tego rozdziału: zamiast „położenie maksimów emisji nie zmieniało się w zależności od polaryzacji (rysunek 5.14).”, powinno być „położenie maksimów emisji nie zmieniało się w zależności od polaryzacji (rysunek 5.15).”;
- Rozdz. 5.7, str. 117; zamiast : „... Mn:PEPI 14%. należy zauważyć, że ...”, powinno być „... Mn:PEPI 14%. Należy zauważyć, że ...”;
- Rozdz. 5.8, str. 120, pierwszy akapit rozdziału; zamiast „Mikrownęka składała się z dwóch zwierciadeł Bragga o maksymalnym współczynniku odbicia 530 nm”, powinno być „Mikrownęka składała się z dwóch zwierciadeł Bragga o maksymalnym współczynniku odbicia dla 530 nm”. Zwróć uwagę na komentarz 12;
- Rozdz. 5.8. str. 120, pierwszy akapit tego rozdziału; zamiast „Dzięki małym rozmiarom luster dielektrycznych (6 mm × 6 mm) możliwe było umieszczenie ~~ściśniętej~~ wnęki w kriostacie.”, powinno być „Dzięki małym rozmiarom luster dielektrycznych (6 mm × 6 mm) możliwe było umieszczenie ~~ściśniętej~~ wnęki w kriostacie.”. Użycie słowa „ściśniętej” nie jest właściwe, gdyż nie wiadomo co to oznacza, czym ma być ściśnięta wnęka;
- Rozdz. 6.2, str. 127, ostatni akapit na tej stronie; zamiast „Do struktury dolutowane są ~~kable~~, przy pomocy których przykładane jest napięcie.”, powinno być „Do struktury dolutowane są ~~przewody~~, przy pomocy których przykładane jest napięcie.” Kabel w ogólności może być strukturą zawierającą wiele przewodów. Przewód to jedna linia przewodząca.
- Rozdz. 6.3, str. 129, ostatni akapit na stronie; zamiast „Dodając zewnętrzne napięcie do układu...”, powinno być „Przykładając napięcie do układu...”. Zastosowanie wyrażenie „dodając” sugeruje się, że już jakieś napięcie występowało w układzie, a tym czasem napięcie jest przykładane;
- Rozdz. 6.4, str. 130, pierwszy akapit w tym rozdziale; zamiast „...skąd przechodziła przez obiektyw o aperturze numerycznej NA = 0,75 i na próbkę umieszczoną...”,



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



powinno być „...skąd przechodziła przez obiektyw o aperturze numerycznej $NA = 0,75$ i **padła** na próbkę umieszczoną...”;

- Rozdz. 6.5, str. 132, ostatni akapit na stronie; W zdaniu „Podobne miejsca zmierzono w konfiguracji transmisyjnej” nie zdefiniowano czym są te miejsca. Czytelnik domyśla się jedynie, że są to te same punkty w obszarze próbki testowane w eksperymencie odbicia jak te testowane w eksperymencie fotoluminescencji;

- Rozdz. 6.5, str. 138, drugi akapit na stronie; zamiast „Mody polarytonowe na widmie z rysunku 6.12d są poszerzone i nie **oddaje** czystej relacji RD” powinno być „Mody polarytonowe na widmie z rysunku 6.12d są poszerzone i nie **oddają** czystej relacji RD”;

- Rozdz. 6.7, str. 147, pierwszy akapit na tej stronie; zamiast „Wraz z malejącą mocą pobudzania (rysunek 6.23e–h) **zauważalna** jest zmniejszenie...” powinno być „Wraz z malejącą mocą pobudzania (rysunek 6.23e–h) **zauważalne** jest zmniejszenie...”;

- Podpis pod Rys. 6.30, dotyczy panelu (d); zamiast „...zachodzi w **w** obrębie...” powinno być „...zachodzi w **w** obrębie...”;

- Rozdz. 7.1, str. 161, pierwszy akapit na stronie; zamiast „...oraz wprowadzenie **własności** nieliniowych...” powinno być „...oraz wprowadzenie **właściwości** nieliniowych...”;

- Rozdz. 7.1, str. 161, pierwszy akapit na stronie; zamiast „...poprzez przykładane zewnętrzne napięcie zmienia ułożenie molekuł we wnętrze...” powinno być „...poprzez przykładane zewnętrzne napięcie zmienia **się** ułożenie molekuł we wnętrze...”;

- Rozdz. 7.4, str. 167, ostatni akapit rozdziału; zamiast „...z rezonansem ekscytonowym przy 2,4**meV** ...” powinno być „...z rezonansem ekscytonowym przy 2,4 **meV** ...”;

- Rozdz. 7.4, str. 167, Rys. 7.4; Skala intensywności nad rysunkiem mogłaby być nazwana;

- Rozdz. 7.5, str. 167, pierwszy akapit rozdziału; zamiast „...na obliczonym widmie parametru Stokesa S2 (rysunek 7.5**gf**)...” powinno być „...na obliczonym widmie parametru Stokesa S2 (rysunek 7.5**gf**)...”;

- Rozdz. 7.6, str. 170, ostatni akapit na stronie; zamiast „...**Wyłącznie** kondensacji w omawianym przypadku ...” powinno być „...**Wyłączenie** kondensacji w omawianym przypadku ...”;

- Rozdz. 7.8, str. 174, drugi akapit na stronie; zamiast „...Aby osiągnąć reżim kondensacji bozonowej, **zajęcie obu z nich** stanów muszą jednocześnie zbliżać się do jedności” powinno być „...Aby osiągnąć reżim kondensacji bozonowej, **obsadzenia obu** stanów muszą jednocześnie zbliżać się do jedności”;

- Rozdz. 7.9, str. 177, pierwszy akapit rozdziału; zamiast „...i położenie, i nie rosną...” powinno być „...i położenie, i nie rosną...”;

Z poważaniem,

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