

dr hab. inż. Piotr Kuświk prof. IFM PAN
Instytut Fizyki Molekularnej
Polskiej Akademii Nauk

POLITECHNIKA POZNAŃSKA WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ I FIZYKI TECHNICZNEJ		
DNIA	18-08-2025	DNIA
WPŁYNEŁO		

Poznań, 11.08.2025 r.

DF-63/8412025

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jana Jacka Raczyńskiego
pt. „Badanie właściwości fizycznych cienkowarstwowych interfejsów metal/PtSe₂”**

Rozprawa doktorska mgr inż. Jana Jacka Raczyńskiego dotyczy porównania właściwości fizycznych kryształu objętościowego, płatków i cienkich warstw PtSe₂ oraz skupia się na badaniach wpływu warstw metalicznych (Ti, Cr, Ni, Pd, Pt) naniesionych na eksfoliowany PtSe₂. Badania w niej prezentowane zostały wykonane na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej w Instytucie Fizyki. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Wojciech Koczorowski, Prof. PP, a promotorem pomocniczym dr inż. Semir El-Ahmar. Realizacja badań prezentowanych w rozprawie była finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu PRELUDIUM-BIS (2019/35/O/ST5/01940) oraz przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej w ramach NAWA PRELUDIUM-BIS (PPN/STA/2021/1/00043).

Przedstawiona do recenzji rozprawa dotyczy ważnej grupy materiałów dwymymiarowych (2D), które stanowią obiecującą klasę nanomateriałów mogących zrewolucjonizować wiele dziedzin nauki i technologii. Ich unikalne właściwości mechaniczne, elektryczne i optyczne są przedmiotem intensywnych badań. Dzięki swoim szczególnym cechom znajdują zastosowanie w takich obszarach, jak elektronika, sensory, materiały kompozytowe czy kataliza. Obecnie wiele uwagi poświęca się na poszukiwanie skutecznych metod wytwarzania urządzeń zawierających materiały 2D jako element aktywny. W ten nurt wpisuje się tematyka niniejszej rozprawy. W tej pracy oprócz charakteryzacji cienkich warstw PtSe₂/Al₂O₃ oraz eksfoliowanego PtSe₂ w różnym otoczeniu warstw metalicznych, przeprowadzono skuteczną dwuetapową strukturyzację PtSe₂ wraz z charakterystyką właściwości elektrycznych otrzymanej struktury. Cienkie warstwy PtSe₂ naniesione na podłoże Al₂O₃ dostarczone były przez firmę Shenzhen Sixcarbon Technology, a kryształ PtSe₂ przez HQ Graphene. Nanoszenie warstw metalicznych odbywało się z wykorzystaniem metody magnetronowego rozpylania na eksfoliowany mechanicznie PtSe₂.

Rozprawa doktorska składa się z siedmiu rozdziałów oraz podsumowania. Zawiera również streszczenie w języku polskim i angielskim, dwa rozdziały uzupełniające, życiorys naukowy, oraz spisy literatury, rysunków i tabel.

W pierwszym rozdziale czytelnik zapoznaje się z zagadnieniami dotyczącymi materiałów 2D oraz ich potencjalnych zastosowań, szczególnie w kontekście możliwości

kontroli właściwości, takich jak ruchliwość nośników. Doktorant sygnalizuje również zagadnienia omawiane w dalszych częściach pracy. Sekcja ta została napisana w sposób przejrzysty i zawiera zwięzły opis wprowadzający zarówno w tematykę, jak i strukturę rozprawy. Mimo że rozdział spełnia swoją funkcję, zawiera kilka istotnych niedociągnięć. W zdaniu „W przypadku określania właściwości interfejsów metal / kryształ PtSe_2 , techniki te uzupełniono o techniki skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz rentgenowskiej spektrometrii fotoelektronów (XPS)” można odnieść wrażenie, że SEM będzie wykorzystywany do określenia właściwości międzywierzchni (w pracy stosowano angielskie określenie interfejs). Technika ta nie pozwala na określenie tych właściwości, które, ogólnie rzecz biorąc, są niezwykle trudne do wyznaczenia również innymi metodami. W tym kontekście cenne okazują się pomiary XPS, które skutecznie wykorzystano do analizy procesów dyfuzji w obrębie międzywierzchni pomiędzy PtSe_2 a warstwami metali. Ponadto we wprowadzeniu zabrakło uzasadnienia, dlaczego zastosowano Ti, Cr, Ni, Pd i Pt jako materiały metaliczne. Pojawia się tutaj również niefortunne sformułowanie „Wybrane metale w interfejsach (Ti, Cr, Ni, Pd i Pt) pełnią funkcję warstw buforowych elektrod stosowanych...”, które nie jest zrozumiałe i wprowadza zamieszanie w definicjach interfejsu i warstwy buforowej łącząc je dodatkowo z elektrodami. W tym rozdziale wspomniano, że PtSe_2 wykazuje dużo większą stabilność chemiczną niż MoS_2 . To stwierdzenie wymaga jednak doprecyzowania, gdyż nie do końca wiadomo, jaki rodzaj stabilności chemicznej Autor ma na myśli.

We wstępie drugiego rozdziału bardzo skrótowo przedstawiono właściwości materiałów 2D, a następnie, w równie ograniczonym zakresie, omówiono właściwości strukturalne i elektryczne PtSe_2 . Ponadto rozdział ten zawiera zestawienie danych literaturowych dotyczących ruchliwości i oporu kontaktu dla urządzenia zbudowanego z kanału aktywnego PtSe_2 i różnych materiałów zastosowanych na elektrody. Takie zestawienie mogło by sugerować, że w swoim doktoracie mgr inż. J. J. Raczyński będzie sprawdzał różne elektrody i określał ich wpływ na właściwości elektryczne układów, niestety takich badań nie przeprowadzono. Tym bardziej, że argumentacja podjętych badań, bazuje na stwierdzeniu, że PtSe_2 wykazuje większą ruchliwość nośników w porównaniu z MoS_2 . Moim zdaniem rozdział ten powinien w sposób pełniejszy wprowadzać czytelnika w zakres pracy doktorskiej, co ułatwiłoby lepsze zrozumienie i śledzenie wyników przedstawionych w kolejnych rozdziałach dotyczących badań własnych. Dotyczy to w szczególności badań XPS oraz spektroskopii Ramana, gdyż główna część rozprawy opiera się na wynikach uzyskanych z wykorzystaniem tych technik. Cennym uzupełnieniem byłoby omówienie zmian w widmach Ramana i XPS dla obu analizowanych struktur krystalograficznych 1H i 1T oraz wyjaśnienie, w jaki sposób i dlaczego naprężenia wpływają na charakter widm Ramana. Liczę na to, że podczas obrony zostaną szerzej omówić właściwości PtSe_2 .

Trzeci rozdział rozpoczyna się od wyjaśnienia oznaczeń próbek badanych w rozprawie, po czym zostały przedstawione metody eksperymentalne (spektroskopia Ramana, rentgenowska spektroskopia fotoelektronów, mikroskopia sił atomowych, skaningowa mikroskopia elektronowa oraz techniki wytwarzania (rozpylanie magnetrone, fotolitografia). W mojej ocenie informacje te są zbyt ogólne, by umożliwić pełne zrozumienie

działania poszczególnych metod. W kilku miejscach nieprecyzyjne sformułowania mogą wprowadzać czytelnika w błąd. Na przykład, Autor wspomina, że „*Pomiary XPS wymagają stosowania środowiska wysokiej próżni (HV) rzędu 10^{-6} [mbar].*” W rzeczywistości próżnia bazowa musi być znacznie wyższa (ciśnienie nawet o 4 rzędy wielkości niższe), wynika to z faktu, że informacja zbierana w czasie tego pomiaru dotyczy powierzchniowych obszarów próbki (kilka warstw atomowych). Ponadto dokładne pomiary wymagają zazwyczaj długiego czasu pomiaru. W tym czasie cząsteczki znajdujące się w komorze, przy niskiej próżni, szybko osadzają się na badanym materiale i zaburzają pomiar. Pojawia się zatem pytanie w jakiej próżni przeprowadzono badania XPS? Nie jest również jasne, w jaki sposób przeprowadzono pomiary wgłębne. Czy pomiar odbywał się w trakcie procesu trawienia czy każdorazowo po określonym czasie procesu trawienia? Mgr inż. J. J. Raczyński również wspomina, że „*W celu analizy głębszych warstw układu, wykorzystano trawienie przez rozpylanie jonów Ar^+ (z ang. "sputter").*” To sformułowanie jest nieprecyzyjne, ponieważ sugeruje, że rozpylane są jony Ar. W rzeczywistości to rozpędzone jony Ar bombardując powierzchnię badanego materiału, wybijają z niej atomy, co umożliwia stopniowe usuwanie (trawienie) materiału i prowadzenie badań wgłębnych. W tym ujęciu zabrakło dyskusji o efektywności rozpylania dla różnych pierwiastków, która odgrywa kluczową rolę przy analizie rozkładów poszczególnych pierwiastków.

Przy omawianiu techniki SEM procesy związane z generowaniem elektronów wtórnych (SE) oraz wstecznie rozproszonych (BSE) zostały opisane w sposób dość ogólnikowy. Ponadto, Doktorant stwierdza, że SE mają energię do 100eV (tutaj błędnie w pracy podano jednostkę, ale to pewnie tylko literówka), a BSE mają energię odpowiadającą wiązce pierwotnej. Oba sformułowania są niewłaściwe, gdyż umownie przyjęto, że energia SE jest mniejsza niż 50eV, a BSE zawiera się w przedziale od 50eV aż do energii wiązki pierwotnej. W tej części zabrakło również, dyskusji o głębokości wnikania elektronów w funkcji ich energii i obszaru z jakiego generowane jest promieniowanie X. Myślę, że taka dyskusja pomogła by lepiej zrozumieć uzyskane wyniki EDS i poprawnie określić skład badanych materiałów, o czym napiszę w późniejszej części recenzji. W kolejnej części rozdziału omówiona została technika lift-off, która jest powszechnie znana i stosowana do wytwarzania elementów elektronicznych. Uważam, że mgr inż. J. J. Raczyński dobrze dobrał tę metodę i zastosował jej dwuetapowy przebieg, aby wytworzyć aktywny pasek $PtSe_2$ i nanieść elektrody. Pewien niedosyt pojawia się przy opisie procesu rozpylania magnetronowego oraz roli pola magnetycznego w efektywności rozpylania. Liczę, że doktorant szczegółowo omówi to podczas obrony.

Rozdział ten zakończony jest omówieniem metody długości transfer (z ang. transfer length method), która pozwala wyznaczyć wartość oporności powierzchniowej warstwy oraz kontaktów (elektrod). Oba parametry mają istotne znaczenie przy doborze technik wytwarzania, jak i doboru materiałów stosowanych na elektrody. Niestety we wzorach 3.2 i 3.3 opis symboli jest nieprecyzyjny, w równaniu 3.3 zamiast R_a powinna pojawić się oporność powierzchniowa R_s . Przy omówieniu wzoru 3.3 Autor wskazuje, że „*możliwe jest wyznaczenie całkowitego oporu elektrod w układzie*”, a jednocześnie przyjął, że „*rezystancja warstwy metalicznej jest zaniedbywalna*”. Przypuszczam, że chodziło o wyznaczenie całkowitego oporu

kontaktów, ale wymaga to wyjaśnienia. Moje zastrzeżenia dotyczą również stosowania znaku mnożenia wektorowego we wzorach (3.2-3.4) oraz podanych jednostek oporności kontaktowej (powinny być wyrażone w jednostkach [Ωm^2]).

W rozdziale czwartym opisane zostały badania własne dotyczące określenia właściwości cienkich warstw $PtSe_2$ naniesionych na podłoże Al_2O_3 . Wyniki tych pomiarów porównano z kryształem objętościowym oraz płatkami eksfoliowanymi mechanicznie. W przeprowadzonych pomiarach widm Ramana zidentyfikowano charakterystyczne mody drgań poprzecznych (E_g) oraz prostopadłych (A_{1g}). Dla próbek o grubości od 1 do 5 monowarstw (ML) zaobserwowano dodatkowo mod złożony (LO). Dla wszystkich badanych próbek, w temperaturze pokojowej, określono parametry spektralne zarejestrowanych modów i stwierdzono, że wraz ze zmniejszającą się grubością warstwy $PtSe_2$ dochodzi do zmiany pozycji energetycznej modów w stronę większych przesunięć ramanowskich. Ponadto zaobserwowano wyraźny wzrost intensywności modu A_{1g} , a tym samym stosunku $I_{A_{1g}}/I_{E_g}$ przy grubościach przekraczających 5 ML (tutaj błędnie dla $I_{A_{1g}}/I_{E_g}$ zastosowano jednostkę umowną, błąd ten został poprawiony w pracy w Nanoscale). Porównanie rozkładów parametrów spektralnych wykazano, że próbki warstwowe charakteryzują się znacznie większą jednorodnością niż oczyszczone metodą eksfoliacji powierzchnie próbki krystalicznej. Autor wskazuje, że wyznaczone zależności pozwalają na wyznaczenie grubości warstwy, z czym trudno się zgodzić, ponieważ dla niewielkich grubości $<5ML$ stosunek $I_{A_{1g}}/I_{E_g}$ jest praktycznie stały w granicach wyznaczonych błędów.

Na podstawie pomiarów XPS kryształu $PtSe_2$ mgr inż. J. J. Raczyński stwierdził, że widmo XPS (rys.4.6) nie wykazuje obecności innych pierwiastków niż Pt, Se, O oraz C, niestety potwierdzenia tego stwierdzenia nie można doszukać się w przeprowadzonej analizie widma, gdyż skupiono się jedynie na Se3d, Pt4f, O1s. Badania te uzupełniono o analizę składu kryształu i płatków eksfoliowanych. Dla kryształu wykazano, że jego skład nie ulega zmianie w funkcji czasu trawienia. Zastanawiająca jest jednak stała (około 6%) obecność tlenu w objętości kryształu. Efekt ten może być wynikiem sposobu prowadzenia tego typu pomiarów, a nie z faktyczną zawartością domieszek tlenowych. Warto, aby Doktorant na obronie wyjaśnił tę kwestię.

W przypadku pomiarów EDS płatków zasugerowano, że w ich składzie znajduje się 78% C. W moim przekonaniu wynik ten, nie jest związany z domieszkami węglowymi w płatku jak sugeruje Autor. Przy grubości płatka 17 μm wiązka elektronów może docierać do taśmy węglowej, na której przyklejony jest płatek, w konsekwencji dając znaczący sygnał EDS. Weryfikacja tego wymagałaby zastosowania różnych energii wzbudzenia, zmieniając głębokość penetracji elektronów lub zastosowanie innego sposobu mocowania próbki na stoliku pomiarowym. Należy podkreślić, że w tym przypadku nie można argumentować tak dużego udziału procentowego węgla zanieczyszczeniami powierzchni gazami resztkowymi (CO i CO_2), gdyż EDS nie jest metodą powierzchniowo czułą. Dotyczy to również analizy tlenu, którego obecność w komorze próżniowej mikroskopu praktycznie uniemożliwia poprawną analizę tego pierwiastka. Szkoda, że nie pokazano pełnego widma EDS i nie przeprowadzono jego szczegółowej analizy, co mogło by potwierdzić/wykluczyć obecność innych pierwiastków

i wzmocnić konkluzje uzyskane z badań XPS. Liczę, że takie widmo zostanie pokazane i omówione podczas obrony.

Oprócz analizy XPS i Ramana, przeprowadzono badania morfologii powierzchni warstw, płatków i kryształu przy użyciu SEM i AFM. Wynika z nich, że szorstkość powierzchni warstw mieści się w zakresie 0,2-1,3 nm, co potwierdza, że otrzymane warstwy są gładkie.

Dodatkowo w rozdziale 4 przeprowadzono analizę zależności temperaturowych parametrów spektralnych podstawowych modów Ramana, w zakresie temperatur od temperatury pokojowej do 523K. Dla wybranych modów drgań wyznaczono temperaturowe współczynniki pierwszego i drugiego rzędu. W zakresie $T=382-397$ K zaobserwowano skokowy, około 30-procentowy wzrost intensywności modów. Analiza korelacji położenia modów wraz ze wzrostem temperatury wskazuje na zwiększenie koncentracji ładunków typu p oraz zmiany naprężenia osiowego odpowiadające ścisnaniu warstw. Zjawiska te przypisano oddziaływaniom warstwa-podłoże, wynikającym z różnic we współczynnikach rozszerzalności oraz desorpcji zaadsorbowanych gazów. Pojawia się tutaj pytanie ile wynosi niedopasowanie sieci pomiędzy podłożem a warstwą $PtSe_2$ i jaką strukturę krystalograficzną wykazują naniesione warstwy. Ciekawi mnie również czy relaksacja naprężenia, która zwykle występuje wraz ze wzrostem grubości warstwy odgrywa tutaj istotną rolę?

Warto podkreślić, że wyniki zaprezentowane w rozdziale 4 zostały opublikowane w dwóch bardzo dobrych czasopismach fizycznych: *Nanoscale* (IF 5.1) oraz *Materials Science and Engineering: B* (IF 4.6). Publikacja tych wyników w renomowanych czasopismach świadczy o wysokiej wartości naukowej przeprowadzonych badań, a fakt, że Doktorant jest pierwszym autorem obu publikacji, odzwierciedla jego samodzielność oraz znaczący wkład w realizację badań.

W rozdziale piątym omówione zostały właściwości eksfoliowanego $PtSe_2$ pokrytego różnymi metalami (Ti, Cr, Ni, Pd, Pt) o grubościach 10 i 15 nm. Wykazano, że nanoszenie warstw metalicznych nie wpływa istotnie na położenie modów charakterystycznych dla kryształu $PtSe_2$ obserwowanych w spektroskopii Ramana, a układy wykazują dobrą jednorodność w płaszczyźnie układu z wyjątkiem układu z warstwą Pt. Znaczące różnice względem kryształu zaobserwowano jedynie w wartościach stosunku całkowitych intensywności modów A_{1g} i E_g , jednakże, trudno doszukać się w doktoracie wytłumaczenia, dlaczego dla różnych pierwiastków występują te zmiany. Przeprowadzono również analizę szerokości połówkowej (FWHM) modów, której zmiany tłumaczy się silniejszym tłumieniem drgań w obecności zewnętrznej warstwy. Ponadto, Autor sugeruje, że zmiany FWHM stanowią miarę zmian w strukturze krystalicznej badanego materiału i pozwalają na określenie stopnia amorficzności badanego układu. Nie jest jednak jasne jak należy to rozumieć, w szczególności, że w pracy pojawiają się takie niefortunne stwierdzenia: „zaobserwowano zwiększenie amorficzności struktury krystalicznej”. Istotne jest również to, że w widmach Ramana nie zaobserwowano dodatkowych modów, które mogłyby świadczyć o tworzeniu nowych wiązań w obrębie interfejsu. W tym kontekście warto zwrócić uwagę na stwierdzenie, że głębokość wnikania promieniowania laserowego wynosi około 10 nm. Pojawia się zatem pytanie: co jest faktycznie próbkowane w spektroskopii Ramana dla warstw metalicznych o grubości 15 nm?

W rozdziale 5 mgr inż. J. J. Raczyński podjął się trudnego zadania analizy procesów dyfuzji pomiędzy warstwą metaliczną a eksfoliowanym PtSe₂. Swoje badania oparł głównie na analizie profili wgłębnych uzyskanych z pomiarów XPS, trafnie dobierając technikę pomiarową do założonego celu. To pozwoliło również zbadać skład warstwy i stan elektronowy poszczególnych pierwiastków na różnych głębokościach przed i po procesie wygrzewania. Autor twierdzi, że we wszystkich próbkach obecne są jedynie pierwiastki pochodzące z eksfoliowanego PtSe₂ (Pt, Se), metali tworzących osadzone warstwy, a także tlen (O) i węgiel (C). Nie wykryto innych zanieczyszczeń. Trudno jednak jednoznacznie potwierdzić ten wniosek, ponieważ, podobnie jak wcześniej, w pracy nie przedstawiono analizy pełnych widm XPS, a należy zauważyć, że po wygrzewaniu w widmach XPS pojawiają się dodatkowe piki (np. Rys. 5.18, 5.23b), których nie było przed tym procesem. W rozprawie dużo uwagi poświęcono obecności tlenu oraz jego dyfuzji w badanych warstwach, a w podsumowaniu stwierdzono, że proces osadzania warstw metalicznych metodą magnetronową prowadzi do wprowadzenia znacznych ilości atomów tlenu do objętości układu. Taki wniosek jest zaskakujący, ponieważ metoda ta jest powszechnie stosowana do wytwarzania ultra czystych materiałów, w tym również takich, które wykazują dużą reaktywność z tlenem. Raczej obecności tlenu w całej objętości warstwy należy doszukiwać się w procesie naturalnego utleniania, choć tutaj też pojawiają się kolejne pytania. Na przykład, dlaczego w przypadku warstwy Ni tlen występuje na całej jej głębokości, skoro wiadomo, że nikiel stosunkowo łatwo ulega pasywacji, tworząc stabilną, bardzo cienką warstwę tlenku, która chroni materiał przed dalszym utlenianiem? Być może granularna/kolumnowa struktura warstwy Ni umożliwia dyfuzję tlenu do jej wnętrza poprzez granice ziaren. Zaskakujące jest również to, że dla metali szlachetnych (np. Pd), które w warunkach normalnych mają niską skłonność do utleniania, również zaobserwowano obecność tlenu w całej objętości warstwy. Dodatkowo, istotne różnice w rozkładach pierwiastków obserwowane dla pokrycia platyną o różnych grubościach są dość zastanawiające, a Autor rozprawy pozostawia czytelnika bez ich wyjaśnienia. Mam nadzieję, że wszystkie te kwestie zostaną szczegółowo omówione i wyjaśnione podczas obrony rozprawy.

Należy pochwalić Doktoranta, za przeprowadzenie wnikliwej analizy stanów atomowych poszczególnych pierwiastków. Jest to trudne i pracochłonne zadanie, z którego Autor był w stanie otrzymać informację o możliwości tworzenia się różnych faz przy zastosowaniu różnych materiałów na elektrody. Nieco niefortunnie w podsumowaniu pojawia się stwierdzenie, że najbardziej obiecujące są Cr i Ni, ponieważ charakteryzują się niewielką skłonnością do tworzenia niepożądanych faz mieszanych, co może sprzyjać zachowaniu dobrych właściwości przewodzących. Należy jednak zwrócić uwagę, że w przypadku Ni i Cr warstwa wierzchnia zawierała 75-80% tlenu. Jak wiadomo tlenki niklu czy chromu są izolatorami, co dyskwalifikuje je jako elektrody. Nieco inaczej mogłoby być, gdyby takie warstwy zostały przykryte warstwą ochronną np. Au, tak jak zrobiono to w rozdział 6. Wtedy jednak należałoby wykonać podobne badania z uwzględnieniem dodatkowej warstwy Au. W przypadku elektrod Pd i Pt zaobserwowano silne zmiany morfologii i liczne defekty

powierzchniowe, które mogą również wpływać na właściwości elektryczne, a tym samym na przydatność tych materiałów w realnych urządzeniach.

W rozdziale 6 przedstawiono zmodyfikowaną metodę wytwarzania struktur w architekturze planarnej, która dotychczas stosowana była w Zakładzie Fizyki Powierzchni i Nanotechnologii do wytwarzania aktywnych kanałów wykonanych z materiałów 2D. W nowym podejściu zastąpiono rozpylanie jonowe trawieniem plazmowym. Zmiana ta umożliwia lepszą kontrolę procesu i eliminuje potrzebę zastosowania wysokiej próżni. W celu zoptymalizowania tej metody niezbędne były badania efektywności procesu trawienia warstw PtSe_2 , które przeprowadzono z wykorzystaniem spektroskopii Ramana. Bazując na uzyskanych wynikach, przeprowadzono strukturyzację topograficzną 3ML PtSe_2 i stwierdzono, że warstwa nie ulega uszkodzeniu po procesie litograficznym (szkoda, że w pracy Autor nie pokazał tych wyników). W drugim kroku naniesiono elektrody wykonane z dwuwarstwy $\text{Ni}(40\text{nm})/\text{Au}(60\text{nm})$. Na tak wykonanym urządzeniu przeprowadzono pomiary oporu kontaktów, rezystancji powierzchniowej i długość transferu ładunku. Stwierdzono, że uzyskane wyniki są zbliżone do wyników zaprezentowanych w literaturze dla innych materiałów 2D. Trudno to jednoznacznie zweryfikować i porównać, ponieważ w pracy panuje dość duży nieporządek w oznaczeniach i jednostkach (np. porównanie wyników w Tabeli 6.3 i 2.2), co sygnalizowałem wcześniej. Niemniej jednak uważam, że zaproponowana metoda przedstawia wartościowe podejście do wytwarzania urządzeń z materiałów warstwowych 2D i stanowi ważny etap w dalszym rozwoju tej technologii.

Zasadnicza część rozprawy kończy się obszernym podsumowaniem, zawierającym konkluzje dotyczące najważniejszych wyników. Wnioski z poszczególnych rozdziałów zostały przedstawione dość szczegółowo powielając wiele treści z głównej części pracy, co niepotrzebnie wydłuża ten rozdział. W tym rozdziale pojawia się też za daleko idące stwierdzenie: *„Uzyskane wyniki wskazują, że z uwagi na swoje unikalne właściwości elektronowe (jak wysoka ruchliwość nośników ładunku i szeroki zakres pasma energetycznego) PtSe_2 ma potencjał do wytwarzania urządzeń....”*, na które nie znalazłem w pracy potwierdzenia, gdyż nie badano ruchliwość nośników ładunku ani pasm energetycznych. Na zakończenie podsumowania Doktorant podkreśla, że warstwy PtSe_2 wykazują duży potencjał aplikacyjny w nowoczesnej elektronice oraz fotodetektorach podczerwieni. Trafnie Autor podkreśla, że dalszy rozwój tych technologii wymaga optymalizacji procesów wytwarzania oraz odpowiedniego doboru materiałów elektrodowych, co było przedmiotem badań przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej.

W rozprawie występuje wiele błędów edytorskich i interpunkcyjnych, a także niestaranności w oznaczeniach na rysunkach oraz w stosowaniu jednostek miar. Zastrzeżenia budzi również niekonsekwentne użycie skrótów, które nie zawsze zostały wyjaśnione. Pomimo tych niedociągnięć, uważam, że rozprawa zawiera wartościowe wyniki, a jej cel został osiągnięty. Jestem przekonany, że zaprezentowane w pracy badania stanowią istotny wkład w rozwój urządzeń opartych na materiałach 2D oraz przedstawiają nowe podejście do optymalizacji procesu wytwarzania planarnych struktur z ich wykorzystaniem. Warto również podkreślić, że Doktorant opublikował trzy artykuły naukowe na podstawie materiału

zawartego w rozprawie — w jednym z nich występuje jako pierwszy i korespondencyjny autor, w drugim jako pierwszy autor, a w trzecim jako drugi autor.

Rozprawa doktorska mgra inż. Jana Jacka Raczyńskiego pt. „Badanie właściwości fizycznych cienkowarstwowych interfejsów metal/PtSe₂” dotyczy analizy właściwości PtSe₂ w różnych formach oraz oddziaływania materiałów metalicznych nanoszonych rozpylaniem magnetronowym na mechanicznie eksfoliowany PtSe₂. Przedstawione w rozprawie zagadnienia są ważne z punktu widzenia wytwarzania urządzeń bazujących na tych materiałach, a wyniki zaprezentowane w rozprawie pokazują możliwości technologiczne jakie dostarcza dwu etapowa strukturyzacja z wykorzystaniem litografii optycznej, trawienia plazmowego i nanoszenia magnetronowego. Biorąc pod uwagę omówione wcześniej wyniki badań, stwierdzam, że spełnione są wymagania ustawowe stawiane kandydatom do stopnia doktora. W związku z tym wnioskuję o dopuszczanie mgra inż. Jana Jacka Raczyńskiego do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

