

**Katedra Metrologii i Optoelektroniki**  
prof. dr hab. inż. Janusz Smulko

Gdańsk, 2022-08-22

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**mgr. inż. Magdaleny Tamulewicz-Szwajkowskiej**

**pt. "Badania właściwości elektrycznych i mechanicznych membran na bazie dichalkogenu metali przejściowych"**

Podstawa prawna: pismo **Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika prof. dr hab. inż. Andrzeja Dziedzica** z Politechniki Wrocławskiej, z dnia 20.07.2022, nr RDN AEE/116/2022.

### 1. Ocena rozprawy doktorskiej

#### 1.1 Wprowadzenie

Celem rozprawy było określenie wybranych parametrów elektrycznych oraz mechanicznych membran wykonanych z materiałów dwuwymiarowych, umieszczonych nad mikrownękami. Do tego celu Doktorantka wykorzystwała mikroskopię bliskich oddziaływań. Na podstawie posiadanej wiedzy stwierdzam, że poruszone zagadnienie dotyczy bardzo atrakcyjnej i aktualnej tematyki badawczej, obejmującej materiały o unikalnych właściwościach fizycznych ze względu na swoje wymiary – warstwy materiałów dwuwymiarowych o grubości kilku lub nawet pojedynczych warstw atomowych. Te materiały powinny znaleźć szereg istotnych zastosowań praktycznych jako ultraczułe sensory czy elementy elektroniczne przeznaczone do pracy w zakresach bardzo wysokich częstotliwości. Z tych względów badania ich właściwości fizycznych oraz rozwój metod ich charakteryzowania są bardzo pożądane.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska liczy 105 stron. W rozprawie wymieniono 161 pozycji literatury. W pracy podano 15 pozycji literatury współautorstwa Doktorantki. W 6 pozycjach doktorantka jest pierwszym autorem. Prawie wszystkie wymienione prace są ściśle powiązane z tematyką poruszaną w rozprawie doktorskiej. Sześć pozycji współautorstwa

Doktorantki jest wymienione w bazie Scopus i były łącznie cytowane 30 razy (bez autocytowań). Największe zainteresowanie środowiska naukowego (22 cytowania) znalazła praca: *Tamulewicz, M., Kutrowska-Girzycka, J., Gajewski, K., Serafińczuk, J., Sierakowski, A., Jadczyk, J., ... & Gotszalk, T. P. (2019). Layer number dependence of the work function and optical properties of single and few layers MoS<sub>2</sub>: effect of substrate. Nanotechnology, 30(24), 245708.* W tej pracy Doktorantka przedstawiła model procesu eksfoliacji mechanicznej badanych kryształów na cienkie warstwy uwzględniając szereg problemów praktycznych jakie występują w tym procesie (wpływ zastosowanej taśmy klejącej, modyfikacje mechaniczne tego procesu oraz zastosowanie podwyższonej temperatury), a które z pewnością mogą zostać wykorzystane przez innych badaczy. W pozostałych opublikowanych artykułach Doktorantka przedstawia wyniki prowadzonych badań w zakresie technologii wytwarzania, sposobu przygotowania do pomiarów i technik charakteryzowania takich materiałów jak MoS<sub>2</sub>, ZrS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, Mo<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>Se<sub>2</sub>.

## 1.2 Ocena ogólna

Opiniowana rozprawa została podzielona w sposób klasyczny, na cztery rozdziały. Pierwszy rozdział, najbardziej obszerny, definiuje jednoznacznie cel rozprawy oraz przedstawia podstawowe właściwości dichalkogenków metali przejściowych. Opisuje metody otrzymywania dwuwymiarowych dichalkogenków metali przejściowych – cienkich warstw tych materiałów o grubości nawet pojedynczej warstwy atomowej. Doktorantka poświęciła cały podrozdział metodzie eksfoliacji mechanicznej, którą szczegółowo przebadła. W bardzo prosty sposób, za pomocą szeregu geometrycznego, podała matematyczny model procesu pocieniania badanych warstw. Zastosowany model opisują parametry pozwalające na porównanie procesu mechanicznej eksfoliacji gdy jest realizowany przy użyciu różnych taśm z klejem. W tej części pracy zawarła szczegółowe wyniki kilku eksperymentów, podając ich właściwości według zaproponowanego modelu matematycznego. Pierwszy rozdział kończy się prezentacją technik przenoszenia uzyskanych warstw materiałów dwuwymiarowych na podłoża, na których bada się te warstwy. Doktorantka przedstawiła przygotowane stanowisko do procesu suchego transferu próbek w zadane miejsce podłoża. Opisuje także projekt przygotowanego podłoża z wnękami mechanicznymi, nad którymi umieszczano materiał dwuwymiarowy jako membranę celem dalszych badań. Poruszana w rozdziale tematyka jest przedstawiona bardzo szczegółowo, w sposób jednoznaczny, pozwalający na wykorzystanie przez innych. To świadczy o opanowaniu przez Doktorantkę ogólnej wiedzy teoretycznej w zakresie rozważanych materiałów i towarzyszących im technologii. Dowodzi dużej wiedzy popartej szczegółową znajomością literatury przedmiotu z ostatnich lat. **Wypełnia ustawowy warunek prezentacji ogólnej wiedzy teoretycznej w ocenianej rozprawie.** Wyniki przedstawione w pierwszym rozdziale rozprawy były przedmiotem publikacji, która jest jedną z pierwszych prac w literaturze prezentujących w tak kompleksowy sposób proces mechanicznej eksfoliacji.



W drugim rozdziale rozprawy przedstawiono metody stosowane do badań wytwarzanych warstw materiałów dwuwymiarowych (mikroskopia optyczna, spektroskopia transmisyjna, fotoluminescencja, spektroskopia Ramana, mikroskopia sił atomowych w wybranych trybach pomiarowych). Podstawy działania wszystkich wymienionych metod zostały szczegółowo zaprezentowane. Scharakteryzowano także możliwości badania tymi metodami poszczególnych właściwości materiałów dwuwymiarowych. Przedstawiono stanowiska pomiarowe dla poszczególnych prezentowanych metod, dostępne podczas realizacji rozprawy doktorskiej. Najbardziej szczegółowo przedstawiono możliwości stosowania mikroskopii sił atomowych w różnych trybach pracy, celem określania właściwości mechanicznych materiałów dwuwymiarowych jako membran (pomiaru stałej sprężystości, odkształcenia lub wartości pracy wyjścia). Zaprezentowana w tym rozdziale wiedza o opisywanych metodach pomiarowych także **wypełnia ustawowy warunek prezentacji ogólnej wiedzy teoretycznej w ocenianej rozprawie.**

Trzeci rozdział rozprawy przedstawia wyniki pomiarów mikroskopem skanującym wybranych materiałów dwuwymiarowych ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ). Rozdział rozpoczęto od przedstawienia parametrów trzech sond wybranych do pomiarów mikroskopowych. Wymieniono wyznaczone wartości pracy wyjścia dla warstw  $\text{MoS}_2$  o różnej liczbie warstw atomowych. Podano także wartości kontaktowej różnicy potencjałów, wyznaczone gdy płatki  $\text{MoS}_2$  o grubości od 1 do 5 warstw atomowych umieszczono na różnym podłożu (Al,  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) lub nad wnęką. Wyniki potwierdziły występowanie zależności między liczbą warstw materiału a kontaktową różnicą potencjałów oraz pracą wyjścia w zależności od zastosowanego podłoża. Uzyskane przez Doktorantkę wyniki należą do nielicznych publikowanych w tym zakresie i wskazują na możliwość wykorzystania warstw badanych materiałów dwuwymiarowych do budowy czujników o wybranych właściwościach fizycznych. Doktorantka przedstawiła w tym rozdziale także wyniki badań ugięcia membran pod wpływem siły wytwarzanej stosowaną sondą.

Czwarty rozdział stanowi szczegółowe podsumowanie prowadzonych badań i uzyskanych wyników zmierzonych wielkości fizycznych, charakteryzujących wybrane struktury dwuwymiarowe.

Poruszone zagadnienia, szczególnie w pierwszym i trzecim rozdziale rozprawy, **potwierdzają, że doktorantka wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, co jest wymagane odnośną ustawą.**

### 1.3 Uwagi krytyczne

Oceniana praca nie jest pozbawiona pewnych wad. Zauważa się błędy edytorskie, ale są bardzo nieliczne jak dla takich prac. Zwrócę jedynie uwagę na brak w spisie oznaczeń wyjaśnienia dla symbolu  $\phi$  (praca wyjścia) oraz przyjęcie odmiennego sposobu skalowania osi na rys. 3.13 i rys. 3.18 (dodanie „n” przy liczbach na osiach) niż na pozostałych rysunkach rozprawy.

W wynikach podanych w tab. 3.3 oraz tab. 3.5 brak informacji czy prezentowane wartości mierzono wielokrotnie, sprawdzając powtarzalność wyników? Nie znalazłem też informacji jak zdaniem Doktorantki mogą zmieniać się uzyskiwane wyniki w wyniku starzenia się badanych próbek (np. pod wpływem adsorbowania wilgoci z powietrza, tworzenia się nowych defektów w strukturach dwuwymiarowych, itp.). Proszę Doktorantkę o komentarz podczas publicznej obrony do podanej uwagi, dotyczącej powtarzalności uzyskiwanych wyników.

Autorka podkreśliła zależność właściwości badanych warstw od występowania dwuwymiarowego gazu elektronowego (str. 80), którego koncentracja zależy od zastosowanego podłoża – była największa dla struktury MoS<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>. Proszę Doktorantkę o komentarz podczas publicznej obrony czy można określić zakres zmian tej koncentracji dla zbioru przykładowych materiałów stosowanych na podłoża. Znajomość takiego zakresu daje możliwość propozycji budowy nowych czujników o pożądanych właściwościach.

Wymienione uwagi krytyczne nie umniejszają bardzo wysokiego w mojej opinii poziomu recenzowanej rozprawy i nowatorskiego charakteru prowadzonych badań.

#### 1.4 Podsumowanie i wnioski

Oceniana rozprawa doktorska stanowi istotny wkład w rozwój metod badań właściwości fizycznych materiałów dwuwymiarowych, w szczególności charakteryzujących ich właściwości mechaniczne. Poruszana tematyka przyczyni się do wykorzystania w przyszłości materiałów dwuwymiarowych jako elementów czujników o wyjątkowych właściwościach. Szczegółowy opis prowadzonych eksperymentów oraz uzyskanych wyników przy zastosowaniu mikroskopii sił atomowych pozwala sprawnie wykorzystać opracowane techniki przez inne zespoły badawcze.

Pragnę podkreślić, że **rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego – modelowania mechanicznego procesu eksfoliacji oraz badań właściwości mechanicznych warstw dwuwymiarowych, wypełniając wymagania stawiane odnośną ustawą.**

## 2. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa, niezależnie od wyszczególnionych uwag krytycznych, stanowi istotny wkład mgr. inż. Magdaleny Tamulewicz-Szwajkowskiej w obszarze badań właściwości wybranych materiałów dwuwymiarowych.

**Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Badania właściwości elektrycznych i mechanicznych membran na bazie dichalkogenków metali przejściowych” spełnia wymagania wymienione w aktualnie obowiązującej Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w zakresie dotyczącym tytułu naukowego i stopni naukowych. Stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Jednocześnie, uwzględniając złożony zakres przeprowadzonych eksperymentów badawczych, zaproponowany interesujący model procesu eksfoliacji i szereg przygotowanych artykułów z uzyskanych wyników, w przypadku pozytywnego przebiegu pozostałych etapów realizacji przewodu doktorskiego, w tym jednoznacznej odpowiedzi na uwagi krytyczne zawarte w recenzji, będę wnioskował o wyróżnienie rozprawy.



.....  
prof. dr hab. inż. Janusz Smulko

