

prof. dr hab. Antoni Ciszewski  
Uniwersytet Wrocławski  
Wydział Fizyki i Astronomii  
Instytut Fizyki Doświadczalnej  
pl. Maksa Borna 9  
50-204 Wrocław

**Recenzja pracy doktorskiej pana mgra Jarosława Lutsyka zatytułowanej  
„Electronic structure of transition metal dichalcogenides with charge density  
waves: the case of 1T-TaS<sub>2</sub> and its heterostructures with graphene”**

Na zlecenie Uniwersytetu Łódzkiego przedstawiam pisemną ocenę rozprawy doktorskiej pana mgra Jarosława Lutsyka. Promotorem w postępowaniu o nadanie stopnia jest pan dr hab. Paweł Kowalczyk profesor Uniwersytetu Łódzkiego na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej tego Uniwersytetu a promotorem pomocniczym pan dr Paweł Dąbrowski, adiunkt na tym samym Wydziale w Zakładzie Fizyki i Technologii Struktur Nanometrowych. Praca jest napisana w języku angielskim. Składa się z pięciu rozdziałów zamkniętych wstępem i konkluzjami oraz bibliografii (205 pozycji). Jest streszczona po angielsku i polsku.

Doktorant jest współautorem sześciu prac opublikowanych w okresie od 2015 r do chwili obecnej, w czasopiśmie zagranicznych lub o obiegu międzynarodowym. Aktualnie przygotowuje do publikacji dwie kolejne prace. Lista publikacji znajduje się na jednej z pierwszych stron dysertacji podobnie jak lista grantów, w których uczestniczył prowadząc badania stanowiące podstawę jego pracy doktorskiej. Z listy wynika, że z grantów Opus 10 i 16 korzystał jako stypendysta oraz kierował grantem Etiuda 7.

Przedmiotem rozprawy są wyniki badań dwóch heterostruktur bazujących na 1T-TaS<sub>2</sub> i grafenie. Pierwsza z nich to układ 1T-TaS<sub>2</sub>/grafen/SiC a druga układ grafen/kryształ 1T-TaS<sub>2</sub>. Celem podjętych przez Doktoranta badań było wytworzenie takich układów oraz scharakteryzowanie oddziaływania między 1T-TaS<sub>2</sub> i grafenem, w szczególności uzyskanie informacji czy i jak elektronowe właściwości obu materiałów zmieniają się w wyniku utworzenia kontaktu między warstwami dominującymi ich strukturę. Należy podkreślić, że obydwa materiały należą do grupy tak zwanych materiałów dwuwymiarowych, których intensywne badania rozpoczęły się wraz z wyizolowaniem grafenu.

Pierwsza część dysertacji jest poświęcona charakterystyce składników stanowiących badane heterostruktury. Ogólne własności TaS<sub>2</sub> i grafenu zostały przedstawione zwięźle i jak na potrzeby ocenianej pracy wyczerpująco w pierwszym rozdziale. Omówienie jest zilustrowane bardzo starannie wykonanymi rysunkami przedstawiającymi struktury atomowe i elektronowe tych materiałów. W drugim rozdziale zostały przedyskutowane elektronowe właściwości różnych faz 1T-TaS<sub>2</sub>. Ten rozdział jest dokumentowany wynikami badań własnych doktoranta uzyskanych metodami XPS, LEED, STM/STS, ARPES uzupełnionymi obliczeniami strukturalnymi DFT. **O ile własności grafenu są już dosyć dobrze poznane to badania dichalkogenków zaczynają się dopiero rozwijać i stąd przedstawione przez Doktoranta w tym rozdziale wyniki uważam za istotny wkład do wiedzy o tych materiałach.** W rozdziale trzecim Doktorant opisał sposób otrzymywania i właściwości grafenu na podłożach germanowych. Charakteryzacja jest oparta na wynikach badań własnych przeprowadzonych tymi samymi co wspomniane wyżej technikami pomiarowymi, uzupełnionymi o AFM/LC-AFM/KPFM, oraz komplementarnie na obliczeniach DFT. Szczególna uwaga została zwrócona na antyoksydacyjną naturę grafenu. W pozostałej części pracy, w czwartym rozdziale, zostały przedstawione wyniki badań heterostruktury 1T-TaS<sub>2</sub>/grafen/SiC a w piątym wyniki otrzymane dla układu grafen/kryształ 1T-TaS<sub>2</sub>. Przedstawione w dysertacji badania mają charakter porównawczy. Stosując w zasadzie taki sam zestaw powierzchniowych technik pomiarowych (XPS, LEED, STM/STS, ARPES, AFM/LC-AFM/KPFM) plus obliczenia modelowe oparte na DFT, Doktorant porównuje strukturę, głównie elektronową, lepiej lub gorzej wyizolowanych warstw 1T-TaS<sub>2</sub> i grafenu z ich strukturą w układach, kiedy pozostają one we wzajemnym kontakcie przez oddziaływanie van

der Waalsa. Porównanie dotyczy również sytuacji, kiedy badaną powierzchnię heterostruktury stanowi jeden albo drugi komponent.

Bazujące na oddziaływaniu van der Waalsa struktury zbudowane z dwuwymiarowych kryształów grafenu, azotku boru lub dichalkogenków metali przejściowych tworzą materiały syntetyczne o zupełnie nowych własnościach od tych, które mają składniki wyjściowe. Gwałtowne przyspieszenie w postępie badań nad takimi materiałami obserwuje się od niedawna. Jest ono związane z odkryciami silnych korelacji stanów elektronowych składników takich heterostruktur, które istotnie modyfikują elektronowe, magnetyczne, optyczne i fotonowe parametry tych nowych materiałów. **W tym aspekcie wybór układów do badań stanowiących przedmiot dysertacji jest bardzo trafny.**

Wykorzystane przez Doktoranta **techniki charakteryzacji próbek zostały również trafnie wybrane** należą bowiem do najnowocześniejszych i najgłębiej wnikających w strukturę materii technik pomiarowych stosowanych w badaniach powierzchni fazy skondensowanej. Godnym podziwu jest wykorzystanie tak wielu technik, zarówno lokalnych (STM, AFM i pochodne) jak i globalnych (XPS, LEED, ARPES), przekazujących informacje zarówno mikroskopowe jak i spektroskopowe. Nie rozumiem podziału, który Doktorant wprowadził w rozdziale 2 dzieląc elektronowe własności 1T-TaS<sub>2</sub> na makroskalowe i nanoskalowe (podrozdziały 2.3.2 i 2.3.3). Domyślam się, że chodziło Mu o rozdzielne omówienie wyników pomiarów przeprowadzonych technikami lokalnymi i globalnymi.

**Wysoko oceniam wartość naukową większości zreferowanych w dysertacji wyników, które uważam za oryginalne i interesujące. Wiele przedstawionych w pracy badań zostało wykonanych po raz pierwszy.** Przedstawiony materiał doświadczalny jest wyjątkowo obszerny, w mojej ocenie nawet zbyt obszerny, jak na pracę doktorską. Doktorant nie był w stanie w pełni go wykorzystać. Widać to, między innymi, w rozdrobnionych konkluzjach, których jest zbyt wiele i którym brakuje hierarchicznego porządku.

**Praca jest wyjątkowo starannie zredagowana.** Jej poprawność językową uważam za bardzo dobrą. Zdarzają się drobne potknięcia, jak stwierdzenie na str. 72 „In previous

chapter few interesting phenomena were investigated” – oczywiście one tam zostały „opisane” a nie „zbadane”. Zamieszczone rysunki, schematy, dyfraktogramy, mikrografie i wykresy są dobrze przygotowane i odpowiedniej jakości. W spisie użytych skrótów nie został ujęty skrót metody pomiarowej „current imaging tunneling spectroscopy”, używany w tekście i podpisach pod rysunkami.

**Sformułowany przez Doktoranta we wstępie dysertacji jej cel został osiągnięty.**

Metodami *ex-situ* wytworzono dwa rodzaje struktur dichalkogenkowo-grafenowych. Pierwszy typ uzyskano przez mechaniczne nałożenie na podłoże G/SiC płatków 1T-TaS<sub>2</sub> eksfoliowanych wcześniej za pomocą taśmy z powierzchni monokryształu 1T-TaS<sub>2</sub>. Drugi, przez transfer grafenu z Ge(001)/Si(001) na folię PMMA a następnie na docelowe podłoże w postaci kryształu 1T-TaS<sub>2</sub>. Obydwie heterostruktury udało się scharakteryzować. Pierwszą jedynie metodami lokalnymi po uprzednim usunięciu ostrzem STM warstwy tlenkowej *in-situ* w warunkach UHV. Drugą również metodami globalnym. Uzyskane wyniki pomiarów zostały porównane między sobą oraz z podobnymi wynikami uzyskanymi dla wyizolowanych 1T-TaS<sub>2</sub> i grafenu. **Wzajemny wpływ składników konstytuujących oraz kolejność ich ułożenia na właściwości fizykochemiczne i strukturę elektronową powierzchni i warstwy przypowierzchniowej nowo wytworzonych materiałów zostały szczegółowo i zadawalająco przez Doktoranta omówione.**

**Na podstawie przedstawionej mi do oceny dysertacji uważam, że Doktorant posiada niezbędne kwalifikacje wymagane od fizyka ze stopniem naukowym doktora.** Szkoda, że na jej podstawie nie potrafię ocenić jakie było Jego zaangażowanie w różne etapy przedstawionych w dysertacji badań. Niestety brak w niej informacji na ten temat. Przykład: na str. 72 Doktorant informuje, że „The studies were carried out at nano- and macroscale using STM/STS, ARPES and compared with DFT calculation, which were performed by theorists in our team.” Oglądając rysunki 41 c), d) i 42 c), d), nie wiem w jakim zakresie stanowiłyby one własność intelektualną Doktoranta a jakim anonimowego członka „our team”. Niezbyt szczęśliwie została również wybrana narracja dysertacji w pierwszej osobie liczby mnogiej.

**Konkludując przedstawianą opinię stwierdzam, że rozprawa doktorska pana mgra  
Iaroslawa Lutsyka odpowiada w zupełności normom i przepisom o rozprawach doktorskich  
określonym w odpowiednim artykule Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych i wnoszę  
o dopuszczenie jej do obrony a autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Wrocław, 23 sierpnia 2021 roku.



prof. dr hab. Antoni Ciszewski