



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

Wrocław, 22 Grudnia 2025 r.

Prof. Robert Kudrawiec
Katedra Inżynierii Materiałów Półprzewodnikowych
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska
ul. Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27,
50-370 Wrocław
Tel.: +48 723 645 481, Fax: +48 71 328 36 96
e-mail: robert.kudrawiec@pwr.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr Małgorzaty Gیزی zatytułowanej
„Interface Engineering for Scalable 2D Material FETs: Contact Resistance,
Dielectric Integration and Large-Area Fabrication” wykonanej pod opieką
prof. Mariusza Zdrojka na Politechnice Warszawskiej**

Praca doktorska Pani mgr Małgorzaty Gیزی jest pracą eksperymentalną z fizyki przyrządów półprzewodnikowych, napisana jest w języku angielskim i jej przedmiotem jest inżynieria kontaktów elektrycznych w tranzystorach polowych (ang. Field Effect Transistors – FET) z kanałem przewodzenia wykonanym z pojedynczej warstwy kryształu van der Waalsa (vdW), tj. mono-warstwy MoS₂ lub WSe₂.

Od momentu demonstracji tranzystora z kanałem przewodnictwa z pojedynczą warstwą z MoS₂ w 2011 roku (B. Radisavljevic, et al., *Nature Nanotechnology* 6 (3), 147-150 (2011) – praca ta jak dotąd cytowana była ponad 17 tys. razy) prace nad tranzystorami polowymi wykorzystującymi pojedyncze warstwy kryształów vdW (MoS₂, MoSe₂, WS₂, WSe₂) cieszą się bardzo dużym zainteresowaniem. Tematyka tą zajmują się grupy badawcze we wiodących ośrodkach naukowych, a prace na ten temat publikowane są w najlepszych czasopismach naukowych (*Science*, *Nature journals*, *Advanced Materials*). Jednym z kluczowych problemów naukowych w tym obszarze badawczym jest uzyskanie odpowiednich kontaktów elektrycznych do MoS₂ lub WSe₂ tj. kontaktów omowych o niskiej rezystancji dla bazy i źródła oraz kontaktów Schottky’ego o pożądanych charakterystykach do bramki. Ze względu na atomowo cienką grubość kanału przewodnictwa oraz charakterystyczną powierzchnię kryształów vdW (powierzchnię bez zerwanych wiązań kowalencyjnych) mamy tutaj do czynienia z innymi wyzwaniem w inżynierii interfejsów między metalem (dielektrykiem) a kryształem vdW niż ma to miejsce w przypadku tranzystorów polowych na bazie krzemu lub półprzewodników III-V. Dlatego mimo ponad 10 lat prac nad tymi tranzystorami wiele zagadnień w tym obszarze pozostaje wciąż otwartych i niniejsza dysertacja poświęcona jest właśnie tym zagadnieniom, tj. technologii i inżynierii interfejsów między kryształem vdW a metalem (dielektrykiem) mającym tworzyć kontakt omowy (Schottky’ego) w tranzystorze polowym. Podsumowując aktualność i ważność podjętego problemu naukowego uważam, że jest to bardzo aktualna i jedna z wiodących tematów w fizyce przyrządów półprzewodnikowych gdzie jest bardzo duża konkurencja naukowa.

unite!
University Network for Innovation,
Technology and Engineering



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Account

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

Biorąc powyższe pod uwagę uważam, że niniejsza rozprawa doktorska stanowi istotny wkład do rozwoju technologii wytwarzania oraz zrozumienia działania tranzystorów polowych na bazie kryształów vdW. Nie mam najmniejszych wątpliwości, że od strony naukowej doktorantka uzyskała bardzo ważne wyniki co potwierdzają publikacje w *Small Methods* oraz *ACS Applied Materials Interfaces* gdzie jest pierwszym autorem oraz dwie inne publikacje w których jest współautorem i które dotyczą kryształów vdW (*ACS Applied Materials and Interfaces* 2x). Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska jest dziełem doktorantki w którym uzyskane osiągnięcia naukowe opisała z klasycznym podziałem na ogólny wstęp, *state-of-the-art* dla podjętego problemu naukowego oraz autorskie wyniki uzyskane w ramach dysertacji. Biorąc pod uwagę specyfikę tematyki, a w tym wykorzystanie wypracowanych procesów i metod badawczych oraz wkład innych członków zespołu w wytwarzanie badanych struktur (tj. eksfoliację i tzw. „processing”), pomiary ich charakterystyk itd., uważam, że jest to bardzo właściwa formuła, która daje doktorantce szansę wykazania się w dojrzałości formułowania wywodów naukowych podpartych wynikami eksperymentalnymi. Doktorantka całkowicie wykorzystała tę okazję i napisała rozprawę doktorską, którą ze względu na zawarte w niej wyniki oraz sposób ich opisu spełnia wymagania zwyczajowo stawiane rozprawą na stopień doktora, a także zasługuje na wyróżnienie. Szczegółowe uzasadnienie mojej opinii o tym doktoracie przedstawiam poniżej.

Recenzowana rozprawa składa się z sześciu rozdziałów i podsumowania, z czego rozdziały 4-6 przedstawiają oryginalne wyniki uzyskane przez doktorantkę, a rozdziały 1-3 wprowadzają czytelnika do tematyki dysertacji i obejmują: rozdział 1 – podstawowe informacje o materiałach dwu-wymiarowych w kontekście ich zastosowań w nano-elektronice; rozdział 2 – opis działania tranzystora polowego opartego o dwu-wymiarową warstwę MoS₂ oraz zagadnień związanych z jego wytwarzaniem i działaniem; rozdział 3 – opis metod/procesów wytwarzania i charakteryzacji tranzystorów polowych na bazie warstw vdW. Podsumowując te trzy rozdziały wprowadzające czytelnika w tematykę dysertacji uważam, że czyta się je bardzo dobrze, w odpowiednich miejscach doktorantka odsyła czytelnika do odpowiedniej literatury, a jej dobór jest właściwy i świadczy o bardzo dobrej znajomości literatury przedmiotu. Pewien niedosyt odczułem przy opisie procesów osadzania metali, dielektryków, trawienia plazmowego, itd. We wstępie są one dość ogólnie opisane a spodziewałem się, że ze wstępu dowiem się zdecydowanie więcej niż z publikacji gdzie te szczegóły nie zawsze są podawane/opisywane. Mam wrażenie, że jest to specyfika tej części wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych nazywana „processingiem”, gdzie kluczową rolę odgrywa tzw. „know-how”, które rzadko opisuje się ze szczegółami. Dlatego chciałbym aby doktorantka podczas obrony odniosła się do tego komentarza i odpowiedziała w jakim stopniu/procencie jej „know-how” wytwarzania FET-ów na bazie kryształów vdW jest opisane w niniejszej dysertacji.

Odnosząc się do zawartości rozprawy opisanej w rozdziałach 4-6, należy tutaj zaznaczyć, że dotyczy ona publikacji w *Small Methods* (rozdział 4), *ACS Applied Materials Interfaces* (rozdział 5) oraz pracy wysłanej do publikacji (rozdział 6), w których doktorantka jest pierwszym autorem.

unite! 
University Network for Innovation
Technology and Engineering



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Wrocław University
of Science and Technology
Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Account
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Rozdział 4 opisuje wytworzenie 120 *n*-typu FET-ów z MoS₂ oraz 120 *p*-typu FET-ów z WSe₂ gdzie nowość polega na zastosowaniu mechanicznej eksfoliacji wykorzystującej złoto na taśmie do eksfoliacji. Ze względu na silniejsze oddziaływanie złoto-atom halogenu (S lub Se) w porównaniu do oddziaływania vdW w MoS₂ (WSe₂) złota taśma umożliwia uzyskanie pojedynczych warstw vdW o dużej powierzchni (dziesiąte części mm²), a tym samym umożliwia uzyskanie wielu tranzystorów w tym samym „processingu”. Doktorantka w ramach tego rozdziału (tj. publikacji M. Giza et al., Exploring the Application of Gold-Assisted Exfoliation in Large-scale Integration of *n*-Type and *p*-Type 2D-FETs, *Small Methods* 2500559 (2025)) dokonała mechanicznej eksfoliacji MoS₂ oraz WSe₂ do pojedynczej warstwy o rozmiarach sub-milimetrowych na utlenione podłoże krzemowe gdzie tlenek krzemu pełnił rolę bramki, a następnie na tak uzyskanych warstwach MoS₂ oraz WSe₂ wykonano omowe kontakty elektryczne (kontakty: źródło i dren) i wyznaczono charakterystyki elektryczne dla poszczególnych tranzystorów oraz przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych charakterystyk. W ten sposób jednoznacznie wykazano, że uzyskane wyniki są powtarzalne. Uzyskane tranzystory porównano z literaturą w tabeli 1 i 2. Nie mam najmniejszych wątpliwości, że są to wyniki na wysokim światowym poziomie. Warto tutaj zaznaczyć, że badania te wykonano w grupie prof. Saptarshi Das z Pennsylvania State University, która jest jedną z wiodących w tej tematyce i badania te były przeprowadzone w ramach projektu Preludium Bis 2 z Narodowego Centrum Nauki, tj. projektu w ramach którego doktorantka miała odbyć staż naukowy powiązany z rozprawą doktorską w zagranicznym ośrodku naukowym. W tym wypadku mogę jednoznacznie stwierdzić, że odbyty staż naukowy oraz uzyskane wyniki w znaczący sposób przyczyniły się do realizacji rozprawy doktorskiej.

Rozdział 5 dotyczy optymalizacji kontaktów omowych (kontakty: źródło i dren) do FET-ów z kanałem przewodzącym z warstwy WSe₂. Są to wyniki opisane w publikacji M. Giza et al., Contact Resistance Engineering in WSe₂-Based FET with MoS₂ Under-Contact Layer: A Statistical Approach, *ACS Applied Materials and Interfaces* 16 (36), 48556-48564 (2024). W tym wypadku doktorantka zaproponowała i zrealizowała wprowadzenie warstwy pośredniej z MoS₂ co umożliwiło obniżyć rezystancję kontaktów. W tym wypadku jako główną przyczynę wysokiej rezystancji kontaktów Au/WSe₂ rozważa się przypięcie poziomu Fermiego przy charakterystycznej energii co skutkuje istotną barierą Schottky’ego. O ile wartości barier nie zostały jednoznacznie powyznaczone przed i po nałożeniu warstwy MoS₂, to na podstawie pomiarów charakterystyk FET-ów wywnioskowano, że za obniżenie rezystancji kontaktów źródło i dren odpowiada obniżenie bariery Schottky’ego. Jest to wniosek spójny z uzyskanymi wynikami i należy tutaj podkreślić, że wniosek ten wyciągnięto na podstawie pomiarów około 160 FET-ów a nie pojedynczej struktury. Nie mam do tej części uwag merytorycznych, a jedynie pytanie czy doktorantka starała się kontrolować kąt skręcenia między warstwą MoS₂ a WS₂ i czy spodziewa się, że uzyskane wyniki mogą zależeć od tego kąta skręcenia ze względu na różne wzory moire.

Rozdział 6 poświęcony jest optymalizacji interfejsu bramka/kanał w FET-ach gdzie kanał jest z WSe₂ lub MoS₂ a dielektryk jest z HfO₂ przy czym głównym



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology
Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Account
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

wyzwaniem jest naniesienie warstwy HfO_2 metodą ALD (ang. Atomic Layer Deposition). Ze względu na wysoką jakość powierzchni warstw WSe_2 oraz MoS_2 eksfoliowanych mechanicznie osadzanie HfO_2 na takiej powierzchni metodą ALD jest dużym wyzwaniem. W tym celu zaproponowano nowatorskie podejście polegające na naniesieniu metalicznych warstw vdW (NbTe_2 , TaTe_2 , PtSe_2 , PdSe_2 , TaSe_2 , NbSe_2), które łatwo się utleniają i przez to umożliwiają depozycję warstwy HfO_2 na ich powierzchni. O skuteczności zaproponowanej metody świadczą uzyskane charakterystyki tranzystorów z podwójną bramką tj. bramką od dołu oraz góry kanału przewodzącego. Prace te podobnie jak prace przedstawione w rozdziale 4 zostały zrealizowane podczas pobytu doktorantki w grupie prof. Saptarshi Das z Pennsylvania State University (taki wniosek wyciągam na podstawie listy autorów publikacji związanej z tym rozdziałem). Nie mam do tej części uwag merytorycznych. Uważam, że są to bardzo interesujące wyniki, które prawdopodobnie będą bardzo dobrze opublikowane i które otwierają możliwości do dalszej inżynierii interfejsów w FET-ach opartych o kryształy vdW.

Podsumowując, uważam że rozprawa doktorska Pani Małgorzaty Gیزی spełnia wszystkie wymagania stawiane przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) oraz zwyczajowo przyjęte kryteria w środowisku fizyki przyrządów półprzewodnikowych. W niniejszej rozprawie Pani Małgorzata Giza dowiodła, że posiada ogólną wiedzę z fizyki przyrządów półprzewodnikowych na wysokim poziomie, jej dzieło jest oryginalne, a ona sama jest gotowa do samodzielnego prowadzenia badań. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr Małgorzaty Gیزی do publicznej obrony niniejszej rozprawy oraz wnioskuję o jej wyróżnienie.

Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie rozprawy:

Uważam, że osiągnięcie naukowe przedstawione w niniejszej dysertacji, tj. inżynieria interfejsów w FET-ach na bazie kryształów vdW jest na najwyższym światowym poziomie w obszarze wytwarzania nowatorskich przyrządów półprzewodnikowych.

Za wyróżnieniem tej dysertacji przemawiają uzyskane wyniki tj. demonstracja działających FET-ów na pojedynczych warstwach WSe_2 lub MoS_2 uzyskanych poprzez eksfoliację mechaniczną wspomaganą złotem, a w tym przedstawienie jak inżynieria interfejsów tj. kontaktów omowych (źródło i dren) oraz kontaktów Schottky'ego (bramka) wpływa na charakterystyki FET-ów. Wysoka rangę tego osiągnięcia potwierdzają czasopisma w których wyniki te zostały opublikowane (*Small Methods* oraz *ACS Applied Materials and Interfaces*). Ponadto oceniana dysertacja sama w sobie stanowi poprawny językowo i merytorycznie opis znaczącego osiągnięcia naukowego, który zasługuje na wyróżnienie.

Robert Kudrawiec



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50

T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Account

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

Uwagi redakcyjne:

Strona 14: '\Where' powinno być 'where', ponadto po równaniu przed 'where' postawił bym przecinek, jest kilka takich miejsc;

Strona 45: aby rzetelnie porównać energie wiązania Au-chalcogen oraz oddziaływania między warstwami MoS₂ to trzeba tą energie podać w eV na komórkę elementarną albo inaczej, nie może być samo eV, tj. ~0.5 eV vs. -0.34 eV;

Strona 82: powinien być indeks dolny przy WSe₂;

...



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Account

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434