UNIWERSYTET WARSZAWSKI
Wydział Fizyki

WYDZIAŁ FIZYKI

dr hab. Johannes Binder
Wydział Fizyki
ul. Pasteura 5
02-093 Warszawa
email: johannes.binder@fuw.edu.pl

Warszawa, 22 grudnia 2025

Recenzja rozprawy doktorskiej M. Sc. Małgorzaty Gizy
pt. „Interface Engineering for Scalable 2D Materials FETs: Contact Resistance, Dielectric Integration and Large-Area Fabrication"

Rozprawa doktorska mgr Małgorzaty Gizy dotyczy tranzystorów polowych wytwarzanych z materiałów dwuwymiarowych (2D), ze szczególnym naciskiem na kluczowe aspekty skalowalności oraz inżynierii interfejsów. Praca została przygotowana na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Mariusza Zdrojka oraz dr. inż. Michała Świniarskiego, pełniącego funkcję promotora pomocniczego. Praca została napisana w języku angielskim w formie klasycznej rozprawy doktorskiej, liczy łącznie 127 stron, a bibliografia obejmuje 177 pozycji.

Na początku rozprawy kandydatka zamieszcza tabelę prezentującą jej wkład oraz wkład współpracowników w poszczególne obszary badawcze i technologiczne. Jest to dobra praktyka i pozwala stwierdzić, w którym obszarze badań kandydatka była wiodącym naukowcem, a w którym korzystała z pomocy ekspertów w danej dziedzinie. Z tabeli tej wynika, że mgr Małgorzata Giza była aktywna w większości obszarów badawczych, poza wzrostem materiałów 2D. Następnie przedstawiono układ pracy, która składa się z siedmiu rozdziałów, bibliografii oraz list publikacji i osiągnięć, rysunków oraz skrótów. Układ pracy jest logiczny i nie budzi wątpliwości. Pierwszy rozdział jest wstępem do tematu i zawiera ponadto motywację oraz cele pracy. Drugi rozdział poświęcony jest właściwościom materiałów 2D oraz fizyce tranzystorów polowych opartych na materiałach 2D. Trzeci rozdział przedstawia metody. Rozdziały 4-6 stanowią zasadniczą część rozprawy, przedstawiając wyniki badań eksperymentalnych. Rozprawa zakończona jest rozdziałem podsumowującym, zawierającym konkluzje, perspektywy i wyzwania. Z listy publikacji zamieszczonej na końcu rozprawy wynika, że autorka jest współautorką pięciu prac naukowych. Trzy publikacje są bezpośrednio związane z rozprawą. Każda z tych prac stanowi osobny rozdział pracy. Dwie prace związane z rozprawą zostały już opublikowane w uznanych czasopismach (Small Methods, ACS Applied Materials & Interfaces), a jedna praca jest obecnie w recenzji. Warto podkreślić, że we wszystkich tych pracach kandydatka jest pierwszym autorem, co potwierdza jej wiodącą rolę w prowadzonych badaniach.

Pozostałe dwie prace, które nie są bezpośrednio związane z rozprawą, również zostały opublikowane w renomowanym czasopiśmie ACS Applied Materials & Interfaces, co pokazuje, że tematyka ta należy do głównego nurtu badań, a uzyskane na Politechnice Warszawskiej wyniki wywierają wpływ na dziedzinę. Autorka podaje również wskaźniki bibliograficzne, które są dobre jak na tak wczesny etap kariery naukowej. Fakt, że liczba cytowań (według Scopus) wzrosła z poziomu 24, podanego w rozprawie, do 33 (stan na 22.12.2025), pokazuje, że najnowsze wyniki są zauważane przez środowisko naukowe. Wyniki uzyskane przez kandydatkę były prezentowane w formie plakatów na uznanych konferencjach w Europie, Azji i w Polsce, a także w formie prezentacji na krajowej konferencji o materiałach 2D. Plakat zaprezentowany na konferencji w Pekinie został nagrodzony. Pani Małgorzata Giza wraz z grupą badawczą otrzymała nagrodę grupową pierwszego stopnia rektora Politechniki Warszawskiej oraz jest współtwórczynią zgłoszenia patentowego. Kandydatka jest stypendystką w projekcie Preludium Bis i brała udział w dwóch innych projektach. Ważne w kontekście tej rozprawy są wyjazdy do grupy prof. Das na Pennsylvania State University w Stanach Zjednoczonych. Jest to jedna z wiodących grup badawczych na świecie w obszarze zastosowań materiałów 2D w nanoelektronice. W ramach dwóch wyjazdów kandydatka spędziła w Stanach Zjednoczonych łącznie 11 miesięcy, a część wyników przedstawionych w rozprawie jest efektem tej współpracy.

W dalszej części recenzji omówione zostaną poszczególne rozdziały. Pierwszy rozdział zaczyna się od krótkiego przeglądu stanu technologii w obszarze zastosowań materiałów 2D dla tzw. „nanoelektroniki". W dalszej części przedstawione są motywacje i cele pracy. Jest to bardzo ważny aspekt każdej pracy naukowej. Autorka w klarowny sposób przedstawia motywację, która dotyczy wskazywania praktycznych wąskich gardeł w wydajności i wytwarzaniu urządzeń opartych na materiałach 2D, jednocześnie uwzględniając podstawowe mechanizmy, które je powodują. Następnie przedstawiony został zakres badań. Składa się on z trzech części: (i) eksfoliacji monowarstwy dichalkogenków metali przejściowych (TMD) z wykorzystaniem złota, (ii) inżynierii oporności kontaktów bazujących na TMD z użyciem warstw van der Waalsa oraz (iii) integracji warstw dielektrycznych za pomocą materiałów metalicznych, działających jako warstwy wspomagające nukleację. Pomimo że rozdział pierwszy jest napisany bardzo zwięźle, zawiera on wszystkie najważniejsze informacje potrzebne do zrozumienia motywacji i celów pracy.

Aspekt, który często się pojawia, a nie został omówiony we wstępie, to tak zwana „dolinotronika" (ang. „valleytronics"), wykorzystująca fakt, że istnieją nieekwiwalentne stany w dolinach K i K'. Chciałbym poprosić autorkę o ocenę możliwości zastosowania tych efektów w praktycznych tranzystorach w przyszłości.

W drugim rozdziale autorka przedstawia podstawowe właściwości TMD, takie jak struktura krystaliczna oraz struktura pasmowa TMD w zależności od grubości warstw. W dalszej części dyskusja skupia się wokół głównego tematu rozprawy, tj. tranzystorów polowych (FET) bazujących na ultracienkich TMD jako materiale aktywnym. Zaczynając od podstawowych zasad działania tranzystora polowego, autorka przechodzi do omówienia poszczególnych mechanizmów bramkowania oraz wstrzykiwania nośników na złączach metalu z półprzewodnikami (TMDs). Jednym z kluczowych aspektów pracy są badania dotyczące efektywnego sterowania

przewodnictwem za pomocą przekładanego napięcia na bramce. Autorka przedstawia ważny parametr, który pozwala porównywać efektywność przejścia tranzystora z trybu OFF do trybu ON, czyli nachylenie podprogowe (SS, ang. subthreshold swing), i pokazuje, w jaki sposób defekty na interfejsie dielektryka wpływają na jego wartość. Ze względu na brak wiązań kowalencyjnych w kierunku prostopadłym do warstw, typowe metody osadzania dielektryków nie mogą być bezpośrednio wykorzystane. Ten aspekt będzie kluczowy w dalszej części pracy, w której przedstawione są wyniki dotyczące właściwości warstw dielektrycznych na TMD. Drugi aspekt, który jest bardzo istotny w kontekście niniejszej rozprawy, został przedstawiony w sposób szczegółowy w dalszej części rozdziału. Dotyczy on fizyki procesów zachodzących na złączach metalu z półprzewodnikiem 2D oraz technologicznych podejść, które mogą być wykorzystane do uzyskania kontaktu omowego. Ten rozdział wprowadza czytelnika w temat i przedstawia wszystkie kluczowe parametry, które pozwalają scharakteryzować urządzenia typu 2D-FET oraz zrozumieć wyniki przedstawione w dalszej części rozprawy. Kandydatka wykazuje dobrą znajomość literatury w temacie i prezentuje teoretyczną wiedzę niezbędną do osiągnięcia celów sformułowanych w rozprawie.

Rozdział trzeci przedstawia informacje dotyczące metod wytwarzania i charakteryzacji. Jasne jest, że oprócz podstawowych właściwości materiałów TMD, sposób ich wytwarzania i strukturyzacji ma ogromny wpływ na końcowe parametry danego urządzenia. Rozdział ten w sposób zwięzły przedstawia schemat wytwarzania struktur oraz poszczególne procesy technologiczne z tym związane. Są to standardowe techniki w zakresie struktur półprzewodnikowych, które, mimo że są dobrze znane od lat, nie zostały jeszcze dostosowane do specyfiki materiałów 2D. Dalsza część rozdziału przedstawia metody charakteryzacji elektrycznej, które zostały wykorzystane w ramach niniejszej rozprawy. Metody przedstawione są adekwatne do osiągnięcia celów pracy. Pomimo omówienia metod wytwarzania i charakteryzacji, rozdział ten pozostawia pewien niedosyt, gdyż nie zawiera informacji na temat zastosowanej aparatury badawczej. Choć informacje te można znaleźć częściowo w innych rozdziałach, ich zebranie w jednym miejscu, choćby w formie tabeli, wraz z opisem laboratorium i układu, na którym przeprowadzono pomiary, byłoby bardzo przydatne.

Następny rozdział (czwarty) jest pierwszym rozdziałem prezentującym wyniki eksperymentalne. Na początku rozdziału zaznaczono, że opiera się on na wynikach opublikowanych w artykule „Exploring the Application of Gold-Assisted Exfoliation in Large-Scale Integration of n-Type and p-Type 2D FETs", który ukazał się w renomowanym czasopiśmie *Small Methods* (IF 9,1, 100 pkt lista MNiSW) w 2025 roku, a w którym Pani Małgorzata Gizy jest pierwszym autorem. W rozdziale tym przedstawiono sposób eksfoliacji z wykorzystaniem złota jako warstwy adhezyjnej, która umożliwia eksfoliację pojedynczych warstw atomowych TMD na bardzo dużej powierzchni, rzędu milimetrów. Autorka wykorzystuje tę metodę eksfoliacji, aby pokazać, w jaki sposób warstwy TMD można zintegrować w strukturę typu 2D-FET. W zaprojektowanej strukturze funkcjonują tranzystory z MoS_2 jako materiał typu n oraz WSe_2 jako materiał typu p. Struktura FET wykorzystuje HfO_2 jako warstwę dielektryczną, na którą monowarstwy MoS_2 i WSe_2 zostały przeniesione przy użyciu taśmy pokrytej złotem. Po całym, dość złożonym procesie wytwarzania (np. z wykorzystaniem trzykrotnej litografii elektronowej) Autorce udało się uzyskać działające urządzenia, które wyróżnią się parametrami na skalę światową w tej dziedzinie. Szczególnie imponująca jest jednorodność wyników elektrycznych wśród ponad 100 mierzonych tranzystorów. Chociaż, jak sama autorka zauważa, wciąż

pozostaje pole do dalszej poprawy, są to niezwykle obiecujące wyniki, zwłaszcza biorąc pod uwagę, że wszystkie monowarstwy zostały wytworzone w jednym procesie. Dodatkowa demonstracja działającego inwertera opartego na tranzystorach typu p i n jednoznacznie potwierdza wysoką jakość uzyskanych urządzeń. Jako sugestię warto byłoby wskazać na początku rozdziału, że wyniki zostały w całości uzyskane podczas stażu w grupie prof. Das w Stanach Zjednoczonych. Do tego rozdziału nasuwa się kilka pytań.

W opisie dotyczącym preparacji folii ze złota autorka napisała: „to remove native oxides or contaminants, the silicon surface is often mildly plasma-cleaned before gold deposition". W opisie nie jest podany rodzaj plazmy, jednak w publikacji znajduje się informacja, że jest to plazma tlenowa. W jaki sposób plazma tlenowa może usuwać tlenki?

W tekście autorka kilka razy wspomina, że dla MoS_2 widocznie występuje więcej zanieczyszczeń, co mają potwierdzać wyniki AFM przedstawione na rysunku 19. Na zdjęciach jednak skala z sugeruje, że nierówności są większe w przypadku WSe_2. Lepszym parametrem byłaby wartość chropowatości RMS. Czy takie wartości zostały wyznaczone dla MoS_2 i WSe_2?

W tym rozdziale krótko wspomniano, że „...the WSe_2 devices underwent an NO annealing... to achieve p-type doping in the channels." Zazwyczaj WSe_2 wykazuje naturalne przewodnictwo typu p. Jak wpłynęło to wygrzewanie na właściwości materiału i jakie byłyby wyniki bez tego dodatkowego procesu?

Z opisu procesu wytwarzania wynika, że tranzystory nie są pokryte dielektrykiem. Jak warunki atmosferyczne wpływają na pomiary?

Demonstracja inwertera została przeprowadzona na dwóch podłożach. Jak autorka ocenia możliwości integracji tych tranzystorów na jednym podłożu?

Wyniki opisane w piątym rozdziale zostały opublikowane w artykule pt. „Contact Resistance Engineering in WS_2-Based FET with MoS_2 Under-Contact Interlayer: A Statistical Approach" w prestiżowym czasopiśmie ACS Applied Materials & Interfaces (IF 8,3; 200 pkt lista MNiSW) w 2024 roku. Kandydatka jest pierwszym autorem tej publikacji. Z listy autorów wynika, że praca powstała w Polsce, a wytwarzanie struktur było prowadzone w laboratoriach Politechniki Warszawskiej. W tym rozdziale autorka zajmuje się drugim zagadnieniem przedstawionym w motywacji pracy, tj. zjawiskami zachodzącymi na kontaktach pomiędzy metalem a półprzewodnikiem 2D. W celu mitygacji problemu tzw. przypinania poziomu Fermiego (ang. Fermi level pinning) mgr Małgorzata Giza proponuje zastosowanie dodatkowej warstwy MoS_2 pomiędzy kontaktem Au/WS_2. Spodziewano się, że niższa bariera oraz bardziej korzystne położenie przypinanego poziomu Fermiego spowodują znaczną poprawę oporu kontaktowego. Uzyskane wyniki potwierdzają tę hipotezę, gdyż opór kontaktowy spada o około 60%. Należy tutaj podkreślić innowacyjny sposób wytwarzania struktur Au/MoS_2/WS_2 oraz ich bardzo dobrą jakość. Fakt, że udało się przenieść całą strukturyzowaną warstwę MoS_2 na warstwę WS_2, zachowując czysty interfejs oraz ostre krawędzie, stanowi bardzo duży sukces. Końcowe wyniki, przedstawione w sposób statystyczny na podstawie 160 tranzystorów FET, dodatkowo podkreślają wagę tych rezultatów, gdyż w literaturze często można znaleźć jedynie wyniki dotyczące pojedynczych urządzeń.

Szósty rozdział jest ostatnim rozdziałem przedstawiającym wyniki eksperymentalne. Publikacja zatytułowana „Integration of high-k gate dielectrics with 2D semiconductors via self-oxidizing vdW metal seed layers", która powstała na bazie tych wyników, jest obecnie w recenzji. Autorka rozprawy podaje, że również w tym przypadku jest pierwszym autorem tej publikacji. Zagadnienie poruszone w tym rozdziale jest bardzo ciekawe i nowatorskie. Obejmuje problem nukleacji warstw w technologii osadzania warstw atomowych (ang. ALD) w przypadku materiałów 2D, które w idealnym przypadku nie tworzą wiązań bezpośrednio z warstwą. Zamiast tworzyć takie wiązania, co oznaczałoby defektowanie aktywnego materiału w tranzystorze, autorzy pokazują, że metaliczne materiały 2D, które ulegają spontanicznemu utlenianiu, spełniają tę rolę bez uszkodzenia materiału półprzewodnikowego. Przedstawione wyniki są bardzo obszerne i dotyczą aż sześciu różnych materiałów. Rysunek 37 pokazuje w sposób bardzo przekonujący efekt takiej warstwy, gdzie widać, że dodatkowa warstwa typu $NbTe_2$, $TaTe_2$, $PtSe_2$, $PdSe_2$, TaS_2 lub $NbSe_2$ w znaczący sposób poprawia morfologię osadzonej warstwy HfO_2. Oprócz analizy morfologii przeprowadzono również pomiary wytrzymałości elektrycznej dla 30 urządzeń typu MIM dla każdego z materiałów wymienionych powyżej. Dodatkowo wytworzono strukturę 2D FET z górną bramką dla TMD hodowanych metodą MOCVD. Dla WSe_2 przetestowano wszystkie sześć materiałów, a dla MoS_2 trzy materiały. Wszystkie pomiary, przedstawione przy użyciu podejścia statystycznego, pokazują, że pomysł z samoutleniającymi się międzywarstwami vdW jest bardzo ciekawym rozwiązaniem, które umożliwia integrację osadzania warstw atomowych (ALD) z półprzewodnikami 2D w zastosowaniach w nanoelektronice.

Wnioski przedstawione w rozdziale siódmym podsumowują w sposób wyczerpujący uzyskane wyniki. Autorka przedstawia na zakończenie najważniejsze osiągnięcia zawarte w rozprawie, a mianowicie: opracowanie i zrozumienie skalowalnej metody eksfoliacji, badanie redukcji oporności kontaktowej poprzez inżynierię warstw pośrednich oraz eksperymentalne potwierdzenie integracji dielektryka wspomaganej warstwą nukleacyjną typu van der Waalsa. W ostatniej części rozprawy autorka omawia perspektywy i wyzwania. Porusza między innymi problem kontaminacji przez polimery w procesie eksfoliacji, który może zostać rozwiązany za pomocą dedykowanego wzrostu heterostruktur van der Waalsa, co jednak nadal wymaga intensywnych badań naukowych.

Przedstawione wyniki eksperymentalne są bardzo dobrej jakości. W szczególności należy podkreślić podejście statystyczne, które było możliwe dzięki dużemu zaangażowaniu kandydatki w laboratoriach. Takie wyniki pozwalają na wyciąganie fundamentalnych wniosków, niezbędnych do podjęcia dalszych kroków w kierunku zastosowania materiałów 2D w przemyśle.

Od strony edytorskiej rozprawa jest bardzo starannie przygotowana i poprawnie napisana; zauważa się jedynie sporadyczne literówki „ ...surface potential is descibe with..." oraz drobne nieścisłości w formatowaniu jednostek, np. „cm-1" zamiast „cm^{-1}".

Nie mam wątpliwości, że rozprawa doktorska mgr Małgorzaty Gizy stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wymogi określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.) oraz wszystkie wymagania zwyczajowe. W związku z tym oceniam pracę doktorską pozytywnie i wnioskuję o dopuszczenie mgr Małgorzaty Gizy

do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora. Ponadto uważam, że zademonstrowanie nowego sposobu nukleacji warstwy HfO_2 na warstwach TMD stanowi istotne osiągnięcie i może mieć zastosowanie w przyszłych rozwiązaniach w nanoelektronice opartej na materiałach 2D. W związku z tym wnoszę o wyróżnienie rozprawy mgr Małgorzaty Gizy.

