

Warszawa, 17.12.2025 r.

dr hab. Michał A. Borysiewicz
Sieć Badawcza Łukasiewicz
- Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki
Al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Małgorzaty Gizy
p.t. „Interface Engineering for Scalable 2D Material FETs: Contact Resistance, Dielectric
Integration and Large-Area Fabrication”

Recenzowana praca poświęcona jest doświadczalnym badaniom możliwości pokonania zdefiniowanych barier technologicznych w wytwarzaniu tranzystorów cienkowarstwowych z dwuwymiarowych dichalkogenków metali przejściowych, w szczególności: MoS₂, WSe₂, i WS₂. Zagadnienia związane z technologiami prowadzącymi do zastosowań dichalkogenków w elektronice cieszą się rosnącym zainteresowaniem od lat podsycanym przez – z jednej strony możliwość zastosowania prostej technologii do wytwarzania samych materiałów - a z drugiej skomplikowaną technologię strukturyzacji przyrządów i wymagane wysokie zrozumienie fizyki materiałów i przyrządów. Taka kombinacja powoduje, że wiele grup na świecie jest aktywnie zaangażowanych w badania nad tymi materiałami, chociaż na różnym - często niewystarczającym - poziomie jakości naukowej. Nie zdradzę wiele, gdy napiszę już w tym miejscu, że recenzowana praca wyróżnia się zarówno wysokim poziomem technologicznym jak i naukowym.

Ze względu na stosowanie monowarstw materiałów jako kanałów tranzystorów, ich strukturyzacja naraża na liczne problemy, związanych ze stabilnością materiału w różnych krokach technologicznych związanych m.in. z fotolitografią, trawieniem, osadzaniem

metalicznych kontaktów, czy osadzaniem dielektryków. Zagadnienia związane m. in. z rozpraszaniem nośników w kanale tranzystora ze względu na istnienie stanów między powierzchniami MX_2 i dielektryka, czy kwestie związane z dopasowaniem bariery na złączach metal- MX_2 stanowią istotne wyzwanie technologiczne, limitujące wykorzystanie pełnego potencjału tych materiałów. Na tym tle zagadnienia poruszane w przedłożonej rozprawie wyróżniają się pozytywnie.

Cel rozprawy został zdefiniowany przez Autorkę jako “zbadanie fundamentalnych wyzwań dotyczących integracji materiałów dwuwymiarowych w przyrządy elektroniczne”. Rozprawa obejmuje trzy powiązane ze sobą technologicznie zagadnienia służące rozwojowi technologii tranzystorów polowych z materiałów dwuwymiarowych (2D FET) wytworzonych z dichalkogenków. Są to: (1) badanie techniki eksfoliacji dużo-powierzchniowych warstw dichalkogenków wspomaganą złotem dla komplementarnych 2D FET, (2) inżynieria kontaktów omowych do 2D FET za pomocą międzywarstwy 2D oraz (3) integracja dielektryka bramkowego w 2D FET za pomocą metalicznych zarodkowych warstw van-der-Waalsa.

Praca została zrealizowana w Pracowni Nanostruktur w Zakładzie Badań Strukturalnych na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej, która posiada wszelkie kompetencje naukowe i techniczne, jak również najwyższej klasy zaplecze sprzętowe niezbędne do przeprowadzenia zaplanowanych badań.

Rozprawa obejmuje 127 stron i jest podzielona na 7 rozdziałów. Wyniki własne Autorki przedstawiono w rozdziałach od 4. do 6., a rozdział 7. zawiera podsumowanie, po którym następuje wykaz wykorzystanej bibliografii, dorobku naukowego, rysunków oraz skrótów. Co istotne, przed pierwszym rozdziałem znajduje się tabela ujmująca zakres realizowanych prac badawczych w ramach doktoratu, podkreślająca nie tylko udział Doktorantki, ale również nazwiska współpracowników realizujących niektóre prace. Odbieram to bardzo dobrze, jako wskazanie istotnej współpracy i oddanie honorów tym, którzy w niej uczestniczyli, przy jednoczesnym pokazaniu, że Doktorantka uczestniczyła, bądź sama realizowała zdecydowaną większość pracy i należy ją słusznie uznać za wiodącą autorkę.

Rozprawa napisana jest po angielsku, poprawnym językiem, chociaż w niektórych miejscach występują kalki z języka polskiego oraz drobne błędy gramatyczne. Nie wpływa to jednak na odbiór pracy.

Rozdziały 1-3 obejmują wprowadzenie, opis materiałów 2D oraz fizyki przyrządów FET oraz sposoby wytwarzania i charakteryzacji przyrządów i elementów przyrządów 2D FET. Części te wprowadzają w tematykę pracy i należy podkreślić, że są bardzo dobrze napisane - szczegółowo, ale nie rozwlekłe, w klarowny sposób wykładając wszystkie niezbędne zjawiska oraz opisując pojęcia potrzebne do zrozumienia pracy. Zabrakło mi jednak we wprowadzeniu opisu układu pracy i zawartości kolejnych rozdziałów – bez niego czytając dalsze rozdziały czasami miałem wrażenie zagubienia w przebiegu tekstu. Na podkreślenie zasługuje również staranny dobór ilustracji do tych części, wspomagających zrozumienie, jak również pozostających w zgodzie z szatą graficzną rozprawy. Ciekawa wydała mi się dyskusja tego, jak bardzo domieszkowanie podkontaktowe jest trudne dla materiałów 2D oraz naświetlenie jak bardzo istotne są ewentualne defekty w tym obszarze. Ponieważ w materiale jest tak mało atomów, każdy defekt czy domieszka mają bardzo istotny wpływ na jego właściwości. Domieszkowanie podkontaktowe, a raczej jego niemożność w materiałach 2D była wskazana jako istotna motywacja do poszukiwania rozwiązań z zastosowaniem m.in. warstw przejściowych vdW. Trochę występuje tu rozdźwięk z opisywanym w rozdziale 4 domieszkowaniem WeS_2 za pomocą NO aby wytworzyć przewodnictwo typu p. Czytelnik zaczyna się zastanawiać czy jednak da się domieszkować materiały 2D, czy nie. Uważam, że w tym miejscu warto by trochę dokładniej opisać procesy domieszkowania warstw 2D, skoro są one wykorzystywane w dalszej części pracy. Zabrakło mi również informacji na temat wygrzewania kontaktów omowych po formowaniu i czy są prace literaturowe pokazujące wpływ takiego kroku na omowość kontaktu. Jest to standardowy krok podczas formowania kontaktów omowych w półprzewodnikowych przyrządach elektronicznych a nie jest tu wspominany.

Rozdział 4 dotyczy eksfoliacji dużych powierzchni monowarstw 2D TMD za pomocą metody wspomaganej złotem. Technika jest dobrze opisana, chociaż pewne stwierdzenia pozostają kuriozalne – np o stosowaniu jednorodnego ciśnienia mechanicznego przez delikatny docisk palcem przez kilka sekund (str. 41). Przypuszczam, że dałoby się stosować jakieś bardziej ustandaryzowane rozwiązanie niż dotyk palcem. Moją ciekawość porusza również kwestia jakości stosowanego materiału wyjściowego. Czy objętościowy materiał jest monokryształem? Czy jest przełamany tak, aby osiągnąć przełom po płaszczyźnie krystalicznej? Jeśli nie, to jaki to ma wpływ na jakość przenoszonych warstw i czy były prowadzone testy wpływu tych cech na jakość przeniesionych warstw? Prosiłbym o odpowiedź na te pytania. Autorka wykazuje, że metoda ta pozwala transferować materiał z

kryształów objętościowych o różnej wielkości powierzchni i wskazuje, że transferowana jest monowarstwa. Pytanie należy jednak zadać o ciągłość tejże. Na rys. 20 (a) widać, że warstwa 2D TMD jest raczej niespójna - chociaż pojedyncza. Zabrakło mi oceny ilościowej jakości przenoszenia i powtarzalności tej techniki. To, co zostało pokazane to bardziej proof of concept, niż opis technologii, nad którą jak wierzę Doktorantka spędziła trochę czasu. Rozumiem, że pozostałe wyniki w tym rozdziale opisujące komplementarne tranzystory są bardziej ekscytujące, ale skoro kluczem jest technika transferu, to powinna zostać dokładniej przeanalizowana. Dalsza część rozdziału opisuje wytworzenie tranzystorów 2D FET typu p oraz typu n. Przy opisie metalizacji kontaktów omowych powinno się znaleźć wyjaśnienie, bądź odnośnik, dlaczego akurat takie sekwencje metali (odpowiednio Au/Ti/Pt oraz Pd/Pt) zostały użyte. Doktorantka wykazała, że wykorzystując opracowaną metodę transferu możliwe jest wytworzenie macierzy 2D FET o bardzo zbliżonych parametrach, co stanowi bardzo istotny krok w stronę wytwarzania wielkoskalowego. Przebadano kilkadziesiąt tranzystorów typu p oraz kilkadziesiąt tranzystorów typu n pokazując ich dobre osiągi i gromadząc dane mogące służyć do analizy statystycznej. Analiza ta nie zostaje jednak przeprowadzona - duża liczba próbek nie jest statystycznie istotna, jeśli nie są liczone rozkłady, średnie, mediany oraz szerokości rozkładu - wykreślone zostały jedynie histogramy, co jest tylko sposobem przedstawienia danych. W tym miejscu przydałaby się analiza zależności danych statystycznych (liczbowych) od procesu transferu 2D TMD. Być może udałoby się wykazać, że rozmiar i przygotowanie powierzchni kryształu objętościowego, przygotowanie powierzchni złota, czy wreszcie siła i czas docisku złota do TMD, jak również warunki trawienia materiału mają istotny wpływ na statystyczne odchylenia parametrów wytworzonych przyrządów. W zasadzie pracy, którą można by wykonać analizując dogłębnie tę technikę i prowadząc wielokrotne cykle optymalizacji w oparciu o dane statystyczne wystarczyłoby na realizację całego doktoratu.

W rozdziale 5 opisano bardzo ciekawy sposób modyfikacji układu pasm na międzypowierzchni 2D TMD/metal tak, aby zminimalizować efekty pinningu poziomu Fermiego, co prowadzi do zmniejszenia bariery tunelowej i poprawy jakości kontaktów omowych przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości powierzchni 2D TMD. Bardzo istotnym osiągnięciem Doktorantki było opracowanie sposobu transferu uprzednio zestrukturyzowanych litograficznie i trawieniem jonowym warstw MoS_2 na WS_2 w odpowiednich miejscach. Ciekawy jestem w jakim stopniu odległości między strukturami wykonanymi w MoS_2 na podłożu oryginalnym zostają zachowane po przeniesieniu na WS_2 .

Wydaje się, że mechaniczny charakter transferu na elastycznym podłożu może spowodować ich zaburzenie. Chciałbym się również dowiedzieć, czemu w przypadku FETów w rozdziale poprzednim były one mierzone w atmosferze powietrza, a w tym rozdziale już w próżni - zabrakło mi komentarza na ten temat, jak również na temat drastycznej różnicy w zakresach napięcia bramki dla tranzystorów opisywanych w rozdziale 4. (kilka V) względem tego opisywanego w rozdziale 5. (100V). Proszę o odpowiedź na te pytania.

Ostatni rozdział obejmujący wyniki własne Doktorantki - rozdział 6 – opisuje zagadnienia związane z formowaniem wysokiej jakości warstwy dielektrycznej na powierzchni warstwy 2D TMD w sposób zapewniający zarówno ciągłość pokrycia jak i nienaruszalność kanału wytworzonego z 2D TMD. Mgr. Giza zastosowała tutaj ciekawe rozwiązanie polegające na transferze warstw metali vdW na powierzchnię 2D TMD, które ulegają samoistnemu utlenieniu w atmosferze powietrza. Badania przeprowadzono dla 6 różnych metali i w przekonujący sposób wykazano zarówno ich utlenianie do poziomu izolatora jak również zaprojektowano eksperymenty obrazujące zmniejszenie chropowatości warstwy dielektryka osadzonego na takie warstwy zarodkowe za pomocą techniki ALD. Uzyskano bardzo gładkie warstwy, a charakterystyka przyrządów top-gate wykonanych z zastosowaniem dielektryków wytworzonych na każdego rodzaju warstwie zarodkowej pozwoliła wykazać istnienie bardzo małej histerezy napięć sugerującej występowanie znikomej liczby defektów międzypowierzchniowych między kanałem a dielektrykiem. Trochę nie rozumiem dlaczego zrealizowane tranzystory miały również bramki od spodu. Przydałoby się również dogłębnie wyjaśnić, dlaczego bramki osadzone na 2D TMD są lepsze niż spodnie bramki, gdzie nie ma mowy o degradacji interfejsu - dzięki nanoszeniu mechanicznemu. Mam również uwagę do wyników XPS – o ile wyniki przewodnictwa przekonująco wskazują, że metale vdW przechodzą ze stanu przewodzącego do izolującego, o tyle widma XPS po utlenieniu wciąż zawierają linie pochodzące od wiązań metal-metal. Biorąc pod uwagę, że mamy do czynienia z monowarstwą - nie jest jasne skąd ten sygnał - proszę o komentarz. Jednocześnie, skoro zostały przeprowadzone pomiary dla 6 metali, warto je wszystkie pokazać. Aby nie wprowadzać dużej liczby danych w tekst rozdziału można je umieścić w załączniku, tak aby czytelnik mógł na ich podstawie wyciągnąć wnioski.

Postawione na początku rozprawy cele zostały zrealizowane, chociaż nie mogę się zgodzić, że Doktorantka wykazała szczególne zrozumienie mechanizmów fizycznych rządzących procesami technologicznymi, jak deklarowała na str. 5 przy określaniu istotnych aspektów

pracy. W tym celu konieczne byłoby przeprowadzenie i przedstawienie – niestety żmudnych – prac dotyczących wpływu różnych etapów rozwoju technologii na przyrządy. To, co zostało pokazane to wybrane zoptymalizowane i działające podejścia do wytworzenia przyrządów – oczywiście w bardzo innowacyjny i trudny sposób. O ile dla publikacji w czasopiśmie o wysokich wskaźnikach wpływu to ważne, bądź najważniejsze, to w rozprawie doktorskiej równie ważna jest prezentacja kolejnych kroków pracy oraz sposobu myślenia i pokonywania przeszkód, bo pozwalają zademonstrować dojrzałość badawczą Doktorantki/Doktoranta. W tej pracy w zasadzie przeszkód nie zarejestrowano i wygląda na to, że wszystko wyszło za pierwszym razem co, jak myślę, w przypadku tak trudnej technologii materiałów nie może być prawdą i szkoda, że ten proces nie został ukazany. Wydaje mi się, że w tym kontekście praca zdecydowanie nie skorzystała na przygotowywaniu opisu wyników własnych w oparciu o publikacje, jak zaznaczono na początku każdego rozdziału.

Analogicznie – mimo deklaracji – analiza statystyczna nie została przeprowadzona. Zademonstrowano bardzo istotne z punktu widzenia dalszego skalowania technologii wytwarzanie dziesiątek przyrządów w jednym kroku, natomiast sama duża liczba przyrządów bez analizy statystycznej mówi tylko o tym, że histogramy ‘na oko’ wskazują na dobrą jakość próbek. To za mało, aby mówić o analizie.

Mimo tego, aspekty nowości w pracy mgr Gیزی są zdecydowane, co poświadczają publikacje w renomowanych czasopiśmie. W mojej ocenie największymi osiągnięciami mgr Gیزی są:

1. Opracowanie technologii przenoszenia dużych monowarstw dichalkogenków metali przejściowych z zachowaniem ich wysokiej jakości oraz zademonstrowanie jej do wytworzenia serii różnych 2D FET.
2. Wskazanie sposobu przygotowywania dużej liczby kanałów tranzystorów w jednym kroku technologicznym, co jest istotne dla rozwoju skalowalności technologii przyrządów na bazie 2D TMD.
3. Wykazanie sposobu wytwarzania dielektryka bramkowego o wysokiej jakości w oparciu o warstwę zarodkowe z metali van der Waalsa.

Układ graficzny rozprawy jest bardzo dobry, widać świadomy dobór grafik oraz kolorystyki wykresów przez Autorkę. Niektóre grafiki mogłyby być wykonane w wyższej rozdzielczości, ale być może mój odbiór wynika z rozdzielczości druku. Praca jest bardzo czytelna.

Mgr Giza jest współautorką 4 publikacji naukowych w czasopismach z tzw. „listy filadelfijskiej”, oraz jednej zgłoszonej do publikacji. Trzeba podkreślić wysoki wskaźnik wpływu czasopism w których Doktorantka publikowała. W 2 pracach opublikowanych i jednej zgłoszonej mgr. Giza jest 1. autorką, co jest wynikiem bardzo dobrym.

Doktorantka jest współautorką 1 zgłoszenia patentowego do UP RP jak również 5 prezentacji plakatowych i dwóch wystąpień ustnych na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych. Jest laureatką nagrody za plakat oraz nagrody grupowej Rekotra Politechniki Warszawskiej. Uczestniczyła w realizacji 3 projektów badawczych jako wykonawca.

Mgr. Giza odbyła dwa kilkumiesięczne staże w laboratorium prof. Das na Penn State University w USA, co razem z jej dorobkiem publikacyjnym pokazuje wyróżniającą się aktywność w zakresie współpracy naukowej.

Doktorantka była opiekunem jednej i współopiekunem drugiej pracy inżynierskiej na Politechnice Warszawskiej.

W obliczu powyższych, aktywność Doktorantki należy ocenić bardzo wysoko.

Mimo wspomnianych uchybień, stwierdzam, że ze względu na otrzymane wyniki rozwiązujące określone problemy naukowe oraz ich potencjalnie wysoki wpływ na rozwój dziedziny wiedzy, rozprawa doktorska mgr Małgorzaty Gizy spełnia z naddatkiem ustawowe i zwyczajowe warunki stawiane pracom do nadania stopnia doktora, zgodnie z art. 187 Prawa o szkolnictwie wyższym i nauce, i składam wniosek o dopuszczenie mgr Małgorzaty Gizy do publicznej obrony pracy doktorskiej.



dr hab. Michał A. Borysiewicz