

Prof. dr hab. Małgorzata Igalson

Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej

Warszawa, 28.07.20

Ocena dorobku naukowego i osiągnięcia naukowego

Rola pierwiastków atmosferycznych w półprzewodnikach dr Rafała Jakiela

Dr Rafał Jakiela swoją drogę naukową związał od początku z Instytutem Fizyki PAN. Jest absolwentem Szkoły Nauk Ścisłych utworzonej przy IFPAN (obecnie wchodzącej w skład Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego). Doktorat n. t. „Mechanizmy dyfuzji w półprzewodnikach A3B5” zrobił pod kierunkiem prof. Barcza w r. 2005 w IFPAN i od 2005 r. do chwili obecnej pracuje tam jako specjalista. W latach 1998-2015 pracował także w ITME w laboratorium epitaksji jako asystent. Począwszy od 1998 roku do dziś uczy fizyki w Zespole Szkół nr 127. W czasie swojego doktoratu i po doktoracie dr Jakiela brał udział w tworzeniu i doskonaleniu aparatury do badań SIMS i jego dotychczasowy dorobek naukowy jest skoncentrowany na wykorzystaniu tej metody w badaniach procesów dyfuzji różnych pierwiastków w półprzewodnikach z grupy IV i II-VI.

Recenzja prac przedstawionych do oceny nt.

Rola pierwiastków atmosferycznych w półprzewodnikach.

Habilitant do swojego dorobku podlegającego szczegółowej ocenie wybrał 6 prac, z czego 5 zostało opublikowanych w periodykach z listy filadelfijskiej, o zróżnicowanej wartości współczynnika IF (pomiędzy 0.54 a 2,183). Pierwszym autorem dr Jakiela jest w trzech publikacjach, akurat niestety są to czasopisma o niskiej wartości IF. Tematem wiodącym we wszystkich pracach jest badanie rozkładu i dyfuzyjności pierwiastków znajdujących się w atmosferze tj. H, C, N and O w szeroko-przerwowym materiałach takich jak GaN, SiC, ZnO. W części przypadków domieszki te były wprowadzane w sposób intencjonalny do materiału a czasem pojawiały się w sposób niekontrolowany (dyfuzja z podłoża, zanieczyszczenie pojawiające się w czasie procesu). Pomiary koncentracji i rozkładu tych powszechnie występujących domieszek są przedmiotem zainteresowania technologów od wielu lat, natomiast ograniczona czułość przyrządów pomiarowych utrudnia ich wykrycie.

W pracy H1 habilitant zajął się problemem ważnym z punktu widzenia zastosowań: w jakim stopniu tlen stanowiący powszechnie występującą domieszkę w epitaksjalnym GaN pochodzi z podłoża Al₂O₃, a w jakim z zanieczyszczeń na powierzchni podłoża. Praca ta powstała w wyniku realizacji europejskiego projektu SPIRIT. Mierząc z dużą dokładnością profile SIMS w próbkach GaN na specjalnie przygotowanych szafirowych podłożach oraz na GaN implantowanych tlenem dr Jakiela pokazał, że tylko niezwiązany tlen z interfejsu Ga/Al₂O₃ lub z przypowierzchniowej warstwy podłoża Al₂O₃ implantowanego tlenem może dyfundować podczas procesu epitaksji, natomiast nie zachodzi dyfuzja tlenu z podłoża po

wprowadzeniu zniszczeń wywołanych bombardowaniem argonem oraz z warstwy GaN implantowanej tlenem naniesionej przed procesem epitaksji. W badaniach implantowano izotop tlenu O18, zwiększając w ten sposób czułość pomiarów SIMS o 2 rzędy wielkości. Jest to w mojej opinii ciekawa praca opisująca dobrze zaprojektowany eksperyment, aż szkoda że nie została opublikowana w lepszym czasopiśmie.

Praca H2 opublikowana w Journal of Applied Physics zawiera badania węgliku krzemu typu p i n implantowanego różnymi dozami wodoru, a następnie wygrzewanego. Profile dyfuzji świadczą o różnicach między ruchliwością wodoru w materiale typu n i p, oczekiwanych zresztą ze względu na różną koncentrację wakansji sprzyjających dyfuzji w zależności od położenia poziomu Fermiego. Stwierdzono także, że proces dyfuzji wodoru nie jest opisywany przez prawo Ficka - jest zjawiskiem bardziej skomplikowanym, w którym biorą udział inne naładowane defekty. W pracy tej, choć wieloautorskiej, widać że udział dr Jakiety jest znaczny (najważniejsze wyniki eksperymentalne to właśnie profile SIMS), choć skromnie został wyceniony przez samego Autora na 40%.

W kolejnej pracy (H3) zespół z udziałem dr Jakiety kontynuował badania związane z SiC, motywując to przede wszystkim wagą podnoszonych zagadnień aplikacyjnym znaczeniem tego materiału o dużym jakim jest węglik krzemu. Badano nie tylko rozkład i dyfuzję wodoru, ale także tlenu, usiłując rozwiązać zagadkę wyjątkowo dużych koncentracji tlenu w pustych przestrzeniach i jamach w obszarze największych zniszczeń radiacyjnych. Ilość tlenu przekraczała w tym stosunkowo wąskim obszarze koncentrację tlenu w całej warstwie. Zaproponowano wyjaśnienie, że tlen ten pochodzi z krawędzi płytki wskutek wygrzewania, nawet wtedy gdy atmosferą w której wygrzewano jest argon, aczkolwiek po wygrzewaniu w parze wodnej koncentracje są jeszcze większe. Podobnie jak w poprzednich pracach, wykonanie badań SIMS i ich analiza była głównym wkładem habilitanta do tej pracy i stanowiły one istotny jeśli nie najważniejszy jej element.

Przedmiotem pracy H4 było badanie dyfuzji wodoru w epitaksjalnym GaN – znów istotny problem z aplikacyjnego punktu widzenia. Jest to w pewnej mierze kontynuacja badań dr Jakiety prowadzonych w ramach doktoratu i opublikowanych m. in. w 2002 r (poz. [47]). Badano próbki wzrastane metodą MOCVD a także metodą MBE z wykorzystaniem plazmy PAMBE, w której, w odróżnieniu od MOVPE wodór nominalnie nie jest nieobecny w procesie. Wykorzystano różne podłoża aby sprawdzić wpływ gęstości dyslokacji na proces dyfuzji. Badania SIMS przeprowadzane przez habilitanta pozwoliły na stwierdzenie, że bez względu na rodzaj procesu oraz ilość dyslokacji brak jest dyfuzji wodoru w próbkach typu n i silną dyfuzję wodoru w próbkach typu p. Potwierdzono w ten sposób teoretyczne obliczenia o różnej energii aktywacji migracji wodoru w zależności od jego stanu ładunkowego a także wyniki eksperymentalne uzyskane przez innych badaczy. Nowym elementem w tej pracy jest zbadanie wpływu obecności dyslokacji w warstwie na proces migracji wodoru, a także wykorzystanie dwóch rodzajów procesu wzrostu – MOVPE i MBE.

W pracy H5 pierwiastkiem atmosferycznym, którego dyfuzja jest przedmiotem badań metodą SIMS to znów tlen, tym razem w krzemie w detektorach stosowanych w CERN. Punkt ciężkości pracy to ulepszenie metody badawczej dzięki czemu, jak stwierdza Autor, osiągnięto nigdzie nie raportowany dotąd poziom czułości wynoszący 2×10^{15} at/cm⁻³. Taką koncentrację tlenu zaobserwowano w Si wytwarzanym metodą epitaksji z fazy gazowej a

osiągnięcie tak wysokiej czułości było możliwe dzięki wprowadzonym przez Habilitanta zmianom w układzie eksperymentalnym (zastosowano pompę jonową i kriopułapkę umożliwiającą osiągnięcie próżni rzędu 10^{-11} Torr a także wyższy, niż zwykle stosowany, prąd wiązki). Habilitant określił jakie warunki eksperymentalne muszą być spełnione dla uzyskania wiarygodnych profili w próbkach o różnych grubościach i dokładne określenie równowagowej rozpuszczalności tlenu w krzemie otrzymywanym różnymi metodami. Wyniki tej pracy dokumentują wkład Habilitanta w długoletni program współpracy z CERN i świadczą o żmudnej i może niezbyt widowiskowej pracy nad układem, dzięki której możliwe było otrzymywanie ekstremalnie wysokich czułości oraz wiarygodności pomiarów SIMS.

Praca H6 jest jedyną pozycją z artykułów składających się na osiągnięcie naukowe, której wyłącznym autorem jest dr Jakiela. Ma ona w dużej mierze charakter przeglądowy aczkolwiek jest uzupełniona badaniami profili SIMS uzyskanymi przez Habilitanta przy zastosowaniu różnych warunków eksperymentalnych. Przegląd literaturowy jest na pewno wartościowy dla całej społeczności badaczy zajmujących się wytwarzaniem struktur opartych o szerokoprzerwowe materiały, ale autorskie wyniki dr Jakieli giną w gąszczu informacji zaczerpniętych z literatury. Szkoda, że autor nie próbował uwypuklić, jakie nowe informacje wnoszą jego badania do już istniejących i opisanych w literaturze zjawisk i modeli. Zresztą ta uwaga odnosi się również do niektórych poprzednich prac (H4, H5), w których brak czytelnej informacji, które z otrzymanych przez niego rezultatów to potwierdzenie już poprzednio uzyskanych wyników w innych laboratoriach i ewentualnie na czym polegają różnice.

Podsumowując, stwierdzam, że problematyka badań przedstawionych w Osiągnięciu jest niezwykle istotna dla zastosowań szerokoprzerwowych materiałów półprzewodnikowych w urządzeniach półprzewodnikowych. Wyniki badań prowadzonych przez Habilitanta wnoszą istotny wkład w zrozumienie procesów związanych z dyfuzją różnych pierwiastków w tych materiałach.

Ocena dorobku Habilitanta po doktoracie.

Analizując całokształt dorobku naukowego Habilitanta po doktoracie mogę stwierdzić, że na przestrzeni lat uzyskał on unikalne doświadczenie w charakteryzacji różnych próbek metodą SIMS. Współpracował z wieloma zespołami polskimi (ITME, ITE i IWC PAN) i zagranicznymi (Uniwersytet, Helmholtz-Zentrum w Dreźnie, instytuty należące do Narodowej Akademii Nauk w Ukrainie, Uniwersytet w Tomsku, Politechnika we Lwowie, Uniwersytet Notre Dame, Regensburgu i w Bremie) dzięki czemu jest współautorem aż 160 publikacji powstałych w ciągu 15 lat po doktoracie w bardzo dobrych czasopismach. Artykuły te mają dużą cytowalność, dzięki czemu współczynnik Hirscha dr Jakieli jest bardzo wysoki ($H=22$). Mają one charakter wieloautorski, co jest naturalne w przypadku prac z zakresu „material science”, wymagających współpracy między technologami a specjalistami w zakresie charakteryzacji materiałów i struktur. Jednakże dr Jakiela w nielicznych tylko występuje jako pierwszy lub drugi autor. W całym jego dorobku po doktoracie to tylko 11 prac. Można więc sądzić, że wnosił on do większości prac swoją ekspercką wiedzę i umiejętności dotyczące badań metodą SIMS, natomiast nie był ich inicjatorem i pomysłodawcą. Tym niemniej uczestnicząc w tych badaniach wykazał dużą otwartość na współpracę krajową i międzynarodową. Uczestniczył także w konferencjach naukowych, ale znów przeważnie to

nie on prezentował wyniki pracy jakiegoś zespołu. „Plusem dodatnim” niewątpliwie jest natomiast, że już na tym etapie kariery dr Jakiela ma szeroką bazę kontaktów w świecie nauki, co jest niezwykle pomocne w dalszym rozwoju kariery.

Tę gotowość i umiejętność współpracy Habilitant wykazał także uczestnicząc w latach 1998 do dziś w licznych projektach krajowych finansowanych przez KBN i później NCN przez (11) i międzynarodowych finansowanych przez EC (2). We wszystkich był wykonawcą (za wyjątkiem dwóch, w których pełnił rolę jednocześnie wykonawcy i kierownika).

Dorobek dydaktyczny dr Jakieli z natury rzeczy jest mniejszy niż osób pracujących na uczelniach, ale zawiera on elementy popularyzacji wiedzy (udział w Festiwalu Nauki i w dniach Otwartych IFPAN) a także pracę nauczycielską w liceum. Pewnym niedostatkim w dziedzinie dydaktyki jest natomiast fakt, że Habilitant nie prowadził żadnych prac dyplomowych (licencjackich i magisterskich) i nie był opiekunem pomocniczym doktoratów. O ile mi wiadomo, ze względu na współpracę IFPAN i Wydziałów Fizyki UW, PW i UKSW, studenci tych uczelni często wykonują prace dyplomowe w różnych laboratoriach IFPAN. Mam nadzieję że po uzyskaniu habilitacji dr Jakiela będzie aktywniej włączał studentów i doktorantów w swoje prace badawcze, bo jestem pewna, że powinien dzielić się z nimi swoją wiedzą i doświadczeniem.

W sferze organizacyjnej dr Jakiela jeszcze nie miał chyba okazji, żeby zgromadzić jakieś znaczące doświadczenie, natomiast ważnym jego dokonaniem jest bliska współpraca z przemysłem (firma AMMONO) oraz współautorstwo dwóch patentów związanych z technologią związków telluru.

W sumie jestem przekonana, że dr Jakiela to naukowiec dysponujący niewątpliwie bardzo głęboką wiedzą oraz doświadczeniem w projektowaniu i wykonywaniu badań metodą SIMS. Mimo pewnych niedostatków wymienionych w recenzji, wśród których za największy uważam bardzo wąską tematykę badań, ograniczoną praktycznie do jednej metody badawczej jestem zdania, że przedstawione do recenzji Osiągnięcie Naukowe oraz całokształt dorobku dr Jakieli spełniają ustawowe, jak również zwyczajowe wymagania stawiane pracom habilitacyjnym. Wnoszę o dopuszczenie dr Rafała Jakieli do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

Małgorzata Igalson

