

Kalonka, 4 lipca 2020 r.

Profesor dr hab. inż. Włodzimierz Nakwaski
Politechnika Łódzka
Instytut Fizyki
ul. Wólczańska 219
90-924 Łódź
Tel.: 602-631-011
e-mail: wlodzimierz.nakwaski@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy habilitacyjnej
Pana doktora Rafała Jakięły na temat
„Rola pierwiastków atmosferycznych w półprzewodnikach”
przygotowana dla Rady Naukowej Instytutu Fizyki Polskiej
Akademii Nauk
al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

Tematem autoreferatu Pana doktora Rafała Jakięły, stanowiącego podstawę Jego starań o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne, jest zbadanie własności półprzewodników o szerokiej przerwie energetycznej [na przykładzie azotku galu (GaN), tlenku cynku (ZnO), węgla krzemu (SiC) oraz krzemu (Si)] domieszkowanych atomami będącymi głównymi gazowymi składnikami ziemskiej atmosfery, czyli atomami wodoru, węgla, azotu i tlenu. Cała działalność naukowa Pana dra Rafała Jakięły była ściśle powiązana z powstałym w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie Laboratorium Spektrometrii Masowej Jonów Wtórnych, czyli pomiarów metodą SIMS (*Secondary Ion Mass Spectroscopy*). Właśnie w tej nowoczesnej metodzie pomiarowej specjalizował się doktor Rafał Jakięła, więc oparł na niej swoje starania o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego, o czym zresztą pisze w Swoim autoreferacie. Łatwo zauważyć, że nie był jedynie zwykłym użytkownikiem aparatury SIMS, natomiast wraz z innymi pracownikami Instytutu Fizyki PAN brał czynny udział w opracowywaniu specjalnych procedur i konfiguracji spektrometru, co pozwoliło uzyskać polepszenie jego czułości do poziomu, jak pisze, nieosiągalnego w większości innych laboratoriów.

Zgodnie z aktualnymi przepisami, starania o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego wymagają między innymi potwierdzenia przez wnioskodawcę Jego/Jej aktywności naukowej po uzyskaniu stopnia naukowego doktora. W ostatnich czasach jest to najczęściej dokonywane poprzez prezentację jednotematycznego cyklu publikacji wnioskodawcy oraz podanie liczby Jego/Jej cytowań, wartości indeksu Hirscha, informacji o stażach w znanych ośrodkach naukowych oraz o kierowaniu badaniami naukowymi. W powyższym celu dr Rafał Jakięła przedstawił liczący 51 stron autoreferat zawierający powyższe dane. Dołączył do niego spis opublikowanych artykułów w czasopismach naukowych obejmujący aż 154 publikacje w czasopismach indeksowanych na Liście Filadelfijskiej oraz 37

publikacji nie indeksowanych tamże. Zwraca uwagę wysoka renoma powyższych czasopism – 21 artykułów ukazało się w *Acta Physica Polonica*, 14 w *Journal of Crystal Growth*, 13 w *Applied Physics Letters*, 12 w *Journal of Alloys and Compounds*, 9 w *Physical Review B*, 8 w *Semiconductor Science and Technology*, 4 w *Journal of Physics: Condensed Matter* i 4 w *Journal of Applied Physics*. Ponadto dołączony do autoreferatu Załącznik 4 zawiera tytuły 2 zaproszonych wykładów habilitanta, tytuły 2 wygłoszonych przez Niego osobiście konferencyjnych prezentacji (spośród wszystkich 15, w których brał udział), tytuły 6 Jego wystąpień seminaryjnych, informacje o uczestnictwie w 12 zespołach badawczych (w tym dwukrotnie jako kierownik wykonawca) realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych, informacje o dwutygodniowym stażu w Chalmers Institute w Geteborgu (Szwecja) i tygodniowym pobycie w instytucie badawczym Helmholtz-Zentrum Dresden – Rossendorf e.V., Niemcy w ramach European Community w celu realizacji projektu „*Oxygen diffusion into GaN from oxygen or argon implanted Al₂O₃*”, informacje o współpracy z firmą Ammono, z firmą Vigo, z firmą ASM, z Leibniz Institute of Crystal Growth (Niemcy) oraz z Freiburger Compound Materials GmbH (Niemcy), tytuły dwóch patentów, których był współautorem, oraz Sumaryczny Impact Factor równy 304, liczbę 1974 cytowań Jego publikacji (w tym 1737 cytowań bez autocytowań) oraz Indeks Hirscha równy 22. Powyższe osiągnięcia dokumentują niewątpliwie ponadprzeciętne sukcesy naukowe dra Rafała Jakieli, chociaż ilości Jego zaproszonych wykładów, osobistych wystąpień konferencyjnych i seminaryjnych oraz dłuższych staży naukowych w liczących się zagranicznych ośrodkach naukowych są nieco rozczarowujące.

Zgłoszony do oceny autoreferat dra Rafała Jakieli z pewnością nie jest tradycyjną pracą habilitacyjną w postaci jednotematycznego cyklu publikacji analizujących jego tytułowe zagadnienie badawcze bardzo głęboko, bardzo szeroko i bardzo wyczerpująco. To, co łączy te dość różnotematyczne publikacje zgłoszonego przez dra R. Jakielę cyklu, to przecież nie jakieś podobne własności różnych badanych materiałów półprzewodnikowych zawierających w swym składzie pierwiastki atmosferyczne, a jedynie użyta do ich zbadania metoda powszechnie znana jako metoda SIMS, o której była już w tej recenzji mowa wcześniej. Została ona przez habilitanta umiejętnie zastosowana do zbadania nie tylko roli pierwiastków atmosferycznych w półprzewodnikach, ale również do opisu różnych własności aż kilkudziesięciu innych bardzo różnych materiałów półprzewodnikowych.

Publikacje Habilitanta są w swej większości pracami wieloautorskimi - opisują wyniki różnorodnych badań różnych własności różnych materiałów uzyskane przez liczne zespoły badawcze z różnych ośrodków i o różnych składach. Tematyczna różnorodność badanych materiałów jest konsekwencją dysponowania przez wnioskodawcę aparaturą przydatną do wykorzystania w różnych badaniach oraz, co warto jest podkreślenia, ponadprzeciętną Jego umiejętnością jej stosowania. Stąd obecność dra Rafała Jakieli wśród autorów tak różnych publikacji dokumentujących różne osiągnięcia naukowe różnych ośrodków naukowych potwierdza jakość Jego pomiarów SIMS oraz umiejętność kreatywnego użycia tej aparatury w różnych badaniach naukowych. Jest zrozumiałym, że trudno takie wieloautorskie wyniki badawcze wykorzystać do przygotowania indywidualnej rozprawy habilitacyjnej w jej tradycyjnym rozumieniu. Jednakże mimo powyższych ewentualnych zastrzeżeń uważam, że podjęta przez Pana doktora R. Jakielę próba opisu zastosowania metody SIMS do tak licznych i tak różnych zamierzeń badawczych dowodzi Jego dojrzałości naukowej oraz wiedzy dotyczącej fizyki analizowanych procesów, a przede wszystkim umiejętności kreatywnego wykorzystania metody SIMS do różnych celów badawczych.

Konieczność przygotowania rozprawy habilitacyjnej zmusiła Pana doktora R. Jakielę do wybrania takiego jej tematu, który zgodnie z przepisami byłby wystarczająco aktualny i wysoce potrzebny, a który byłby wsparty przez wystarczającą ilość Jego publikacji

wyselekcjonowanych spośród ich pełnego spisu. Habilitant próbował więc dostosować Swoj imponujący dorobek publikacyjny do przygotowania tradycyjnej rozprawy habilitacyjnej, co zmusiło go do wykorzystania w niej jedynie małej części Swojego bogatego dorobku publikacyjnego. I taką właśnie okrojoną rozprawę dostałem do recenzji.

Osobnym problemem jest postulowana jednostronnie przez Habilitanta wysokość Jego osobistego wkładu do osiągnięć opisanych w wieloautorskich publikacjach stanowiących podstawę Jego starań o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego. O ile przyjęty przez Niego 100% udział w przypadku pracy monoautorskiej nie budzi zastrzeżeń, to jednak postulowany 70% udział w przypadku pracy autorstwa 6 osób, czy też 80% udział w pracy autorstwa 5 osób budzi pewne wątpliwości nawet w przypadku pierwszego autora tych prac. Również 40% udziały jednego z dalszych autorów w pracach wieloautorskich są mocno wątpliwe. Rozpisałem się na ten mniejszego znaczenia temat z przykrego dla mnie powodu. Moja ocena osiągnięć naukowych Pana doktora Rafała Jakieli jest wystarczająco wysoka (świadczy o tym dalsza część recenzji) by pozytywnie zaopiniować Jego starania o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego, bez tych mocno naciąganych „procentów”. Natomiast sam fakt tego typu próby bardzo mi się nie podoba, choć chyba powoli staje się to w Polsce pewnym niechlubnym standardem.

Stosując się do obowiązujących przepisów, Pan dr Rafał Jakiela wybrał cykl sześciu Swoich prac pod wspólnym tytułem „*Rola pierwiastków atmosferycznych w półprzewodnikach*”. W Swym autoreferacie podkreślił istotne ograniczenie w detekcji tych pierwiastków związane z powszechnym występowaniem gazów atmosferycznych, co może prowadzić do wysokiego ich niepożądanego dodatkowego wkładu do użytecznego sygnału w różnych badaniach. Jedną z niewielu metod umożliwiających właściwy pomiar koncentracji pierwiastków atmosferycznych na poziomie *ppm* jest właśnie opisywana we wniosku Habilitanta metoda spektrometrii masowej jonów wtórnych zwana w skrócie metodą SIMS. Dodatkową jej zaletą jest możliwość określenia rozkładu głębokościowego koncentracji rozważanych pierwiastków w głąb próbki. Poniżej przedstawiam najbardziej moim zdaniem znaczące wyniki pomiarów opisane w zgłoszonym cyklu prac.

W pierwszym artykule wymienionym w powyższym cyklu (podpunkt 5.2 autoreferatu) dr R. Jakiela zbadał właściwości tlenu w azotku galu. Zauważył, że rozmiary atomu tlenu są podobne do rozmiarów azotu, co ułatwia jego wbudowywanie się w sieć krystaliczną w miejsce luki po tym atomie. Stąd nominalnie niedomieszkowany GaN cechuje się zazwyczaj przewodnictwem typu *n*. Tym niemniej technologia wzrostu warstw GaN jest już na takim poziomie, że poziom w nim koncentracji tlenu jest poniżej mierzalnej jego wartości. Interesującym wynikiem opisywanych pomiarów jest eksperymentalne potwierdzenie dyfuzji tlenu do GaN jedynie w przypadku implantacji tlenu do podłoża Al_2O_3 .

Podobną analizę dotyczącą wodoru w węglu krzemu przedstawił dr R. Jakiela w podpunkcie 5.3 autoreferatu. Z powodu swojej szerokiej przerwy energetycznej, węgiel krzemu stosuje się w przyrządach wysokiej mocy przeznaczonych do pracy w wysokich temperaturach. Dlatego interesującym wynikiem jego badań było zaobserwowanie w nim wysokiej mobilności atomów wodoru w temperaturach powyżej 1000 °C. Ponadto autor autoreferatu zauważył, że wyższe dawki implantacji pociągają za sobą wytworzenie bardzo zdefektowanej warstwy zawierającej tlen. Bardzo ciekawym wynikiem tych badań była obserwacja zależności współczynnika dyfuzji wodoru od jego koncentracji w próbkach implantowanych atomami wodoru o najwyższej energii i wygrzewanych w temperaturze 1150°C.

Z kolei opis własności wodoru w GaN przedstawił dr R. Jakiela w punkcie 5.4 autoreferatu. Pomiary SIMS dowiodły w tym przypadku, że wygrzewanie GaN w temperaturze

900°C przez 15 minut w atmosferze N₂ prowadzi do skutecznego usunięcia z niego wodoru. Ponadto stwierdzono zależność współczynnika dyfuzji wodoru od rodzaju domieszkowania. Jedną z zalet metody SIMS jest możliwość zbadania z jej pomocą profili głębokościowych, co pozwoliło zbadać dyfuzję wodoru w różnych warstwach.

W kolejnym punkcie 5.5 autoreferatu dr R. Jakiela zajął się właściwościami tlenu w krzemie, czyli, jak twierdzi, tematyce najlepiej przebadanej przez pracowników Jego grupy. Spektakularnym wynikiem tych badań było wyznaczenie wzoru ma zależną od temperatury rozpuszczalność tlenu w krzemie. Ponadto dr R. Jakiela zaproponował metodę wyznaczania zależności współczynnika konwersji sygnału jonów tlenu do koncentracji tlenu. Współczynnik ten pozwolił zaobserwować rekordowo niską (poniżej 10¹⁵ cm⁻³) koncentrację tlenu w krzemie.

Jak już napisałem powyżej, recenzowana rozprawa Pana doktora Rafała Jakieli nie jest typową rozprawą habilitacyjną, a jej tytuł z pewnością nie charakteryzuje całego Jego dorobku naukowego lub nawet jego większości. Z jednej strony wspiera rozprawę niezwykle bogaty dorobek publikacyjny jej Autora, znacznie wykraczający poza ramy Jego dorobku zgłoszonego w cyklu wybranych prac. Z drugiej jednakże, choć rozprawa jest oparta na wynikach zamieszczonych w sześciu publikacjach w bardzo renomowanych czasopismach naukowych, wszelako jedynie tylko w trzech z nich dr R. Jakiela jest pierwszym autorem, co nieco podważa Jego dominującą rolę w opisywanych badaniach. Natomiast niepodważalny jest Jego dominujący udział w zastosowaniu w opisywanych badaniach metody SIMS i umiejętności uzyskania z jej pomocą zamierzonych wyników badawczych.

Dlatego po głębokim namyśle, porównując znaczenie dobrych i gorszych stron recenzowanego wniosku, uważam, że, mimo wszelkich wcześniej wymienionych moich zastrzeżeń, dotychczasowy dorobek naukowy Pana dra Rafała Jakieli zasługuje na wyróżnienie jego autora stopniem doktora habilitowanego. Stąd też w końcowej konkluzji stwierdzam, że osiągnięcia naukowe Pana dra Rafała Jakieli, w tym bardzo bogaty spis publikacji, liczne cytowania Jego prac, wysoki indeks Hirscha oraz kilkakrotne kierowanie pracami badawczymi finansowanymi w drodze konkursów, dowodzą zasadności Jego wniosku. Mimo więc wielu moich wcześniejszych wątpliwości, uważam, że powyższe wyniki naukowe Pana dra Rafała Jakieli spełniają ustawowe kryteria i czynią zadość wymogom stawianym w przewodzie habilitacyjnym przez przepisy poniższej ustawy. Przeto popieram Jego starania w sprawie nadania Mu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65/03, poz. 595 z późniejszymi zmianami).

