



Warszawa 04.03.2024

## Ocena osiągnięcia oraz dorobku naukowego badawczego dr Iwony Józwik w postępowaniu dotyczącym przyznania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Pani Iwona Józwik ukończyła studia magisterskie z fizyki na Wydziale Fizyki i Matematyki, Uniwersytetu Marii-Curie Skłodowskiej w Lublinie w roku 2001. Następnie podjęła pracę w Instytucie Fizyki Politechniki Lubelskiej jako asystentka, gdzie prowadziła badania nad optymalizacją warunków technologicznych dla procesu epitaksjalnego lateralnego wzrostu warstw epitaksjalnych (ELO – epitaxial lateral overgrowth) cienkich warstw krzemu. Stopień doktora nauk fizycznych uzyskała w 2006 r. na Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechniki Gdańskiej po obronie rozprawy zatytułowanej „Analiza procesu wzrostu warstw lateralnych na podłożach krzemowych dla baterii fotowoltaicznych”. Rozprawa ta uzyskała nagrodę Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów w 2007r. Przed obroną doktoratu opublikowała 12 prac w tym 6 związanych tematycznie z doktoratem.

Jako osiągnięcie naukowe będące podstawą do wszczęcia i przeprowadzenia postępowania habilitacyjnego dr Iwona Józwik wskazała cykl 9 publikacji zatytułowany „**Rozwój analiz jakościowych opartych na niskoenergetycznej skaningowej mikroskopii elektronowej**”.

Cykl ten można podzielić na dwie części zarówno pod względem chronologicznym jak i zakresu tematycznego. Prace [A7, A8, A9] z lat 2014-2016 dotyczą badania własności strukturalnych warstw grafenowych otrzymanych na podłożach miedzianych i SiC. W badaniach tych wykorzystywała kontrast uzyskiwany w warunkach obrazowania SEM przy niskich napięciach przyspieszających. Prace [A1-A6] są poświęcone rozwojowi metodyki obrazowania lokalnego przewodnictwa w zdefektowanych radiacyjnie półprzewodnikach. Obie części łączy metodyka badawcza, czyli zastosowanie specyficznie dobranych i zoptymalizowanych warunków obserwacji SEM w celu uwidocznienia różnic w lokalnych zmianach przewodnictwa. Temat cyklu publikacji dotyczy „**rozwoju** analiz jakościowych”, logiczne jest więc chronologiczne podejście do jego oceny poczynając od prac dotyczących warstw grafenowych.

Prace te [A7-A9] są wieloautorskie jednak, jak wynika z deklaracji i oświadczeń współautorów, wkład wnioskodawczyni jest wiodący. Habilitantka optymalizuje parametry obrazowania przy niskich napięciach przyspieszających, stosuje zaawansowane metody separacji elektronów wtórych i wstecznie rozproszonych, dostosowuje czasy skanowania i prądu wiązki. Przeprowadza również interpretacje jakościową zmian kontrastu na otrzymanych obrazach. Dyskutowane są aspekty wpływające na kontrast a związane z różnicą pracy wyjścia elektronów w zależności od ilości warstw grafenowych oraz efekty

kanalowania („kontrast kanalowania”) elektronów w przypadku stosowania podłoży z polikrystalicznej miedzi.

Szczególnie znacząca jest praca [A7], w której dokonano bezpośredniej korelacji obrazów SEM oferujących wysoką rozdzielczość przestrzenną ze spektroskopią ramanowską charakteryzującą się dużą czułością w określaniu uśrednionej struktury grafenu (np. ilość warstw). Praca [A7] jest cytowana około 30 razy (wd. Scopus). Z kolei w pracy [A8] przedstawiono wyniki eksperymentu, w którym korelowane są zmiany kontrastu obrazów LV-SEM z mapowaniem lokalnego przewodnictwa z wykorzystaniem mikroskopii AFM. Habilitantka wykazała, że takie korelacyjne podejście pozwala na uzyskanie cennych informacji o parametrach strukturalnych warstw grafenowych takich jak: ilość warstw, wzajemne konfiguracje położenia warstw, uporządkowanie, orientacja oraz to, że możliwe jest uzyskanie takich informacji z dużą rozdzielczością przestrzenną. Opracowana i zoptymalizowana metodologia badań niskonapięciowych, umożliwiła udoskonalenie procesów technologicznych osadzania warstw grafenowych na podstawie stosunkowo prostej procedury badawczej nie wymagającej skomplikowanej preparatyki.

W pracach [A1-A6] opublikowanych w latach 2017-2023, habilitantka skupia się nad opracowaniem i wykorzystaniem techniki niskoenergetycznej skaningowej mikroskopii elektronowej w jakościowym określaniu lokalnych zmian przewodnictwa w półprzewodnikach. W pionierskiej pracy [A1] habilitantka dzięki zastosowaniu niskich napięć przyspieszających, „precyzyjnemu dostrojeniu” parametrów mikroskopu, takich jak energia i prąd wiązki oraz odseparowaniu elektronów wtórnych SE1 od SE2, uzyskała wyraziste obrazy obszarów zdefektowanych w AlGaAs powstałych w wyniku implantacji jonów  $\text{He}^+$ . Obrazy te uzyskiwane są na przełomach dokonywanych bezpośrednio przed pomiarami, co jest stosunkowo nieskomplikowaną operacją i pozwala badać nie utlenioną, płaską powierzchnię przełomu. Wizualizacja tą metodą, wielkość i kształtów obszarów o zmniejszonej na skutek zdefektowania przewodności, zostały porównane z klasyczną metodą ujawniania takich obszarów - opartą na trawieniu chemicznym. Uzyskano również zgodność co do określenia zasięgu zniszczeń z symulacjami rozpraszania jonów programem SRIM. W pracach [A2-A3] habilitantka skupia się nad wyjaśnieniem mechanizmu odpowiedzialnego za powstawanie tego typu kontrastu w obrazach SEM i definiuje akronim DIVA – ang. Damage-Induced Voltage Alteration Contrast. Habilitantka tłumaczy, że zwiększona rezystywność materiału wynika ze zniszczeń wywołanych bombardowaniem wysokoenergetycznymi jonami  $\text{He}^+$  a obserwowany kontrast związany jest ze zjawiskiem ładowania się elektrycznego nieprzewodzących fragmentów próbki podczas naświetlania elektronami. Jednocześnie obszary zdefektowane mają inną niż monokryształ wydajność emisji elektronów wtórnych co jest pierwotną przyczyną obserwowanego zjawiska. W kolejnej Pracy [A4], habilitantka eksploruje zjawiska tworzenia kontrastu i ładowania w SEM dla ultra – niskich energii na poziomie 10eV. W pracy tej dla InAlP implantowanego jonami  $\text{He}^{2+}$  wyznaczono eksperymentalnie wartości energii przejścia E1 i E2 krzywej całkowitej wydajności emisji elektronów, przy której nie obserwuje się zjawiska ładowania próbki. Po raz pierwszy, wykazano istotny wzrost intensywności sygnału emitowanego z obszarów o wysokiej rezystancji przy energiach elektronów 0.02-0.01 keV. Obserwacja ta nie daje się wyjaśnić na bazie klasycznego podejścia, które zakłada odwrotny efekt czyli zmniejszenie intensywności elektronów wtórnych (poniżej E1 elektrony są dodatkowo hamowane). Ostatecznie habilitantka tłumaczy powstający jasny kontrast obszaru o dużej rezystywności zjawiskiem odbijania wiązki elektronów pierwotnych w stronę detektora.

W pracy [A5] zastosowanie Kontrastu DIVA zostaje rozszerzone na materiały na bazie GaN. Habilitantka wykazuje, że dawka elektronów ma znaczenie dla tego typu kontrastu oraz to, że kontrast DIVA w GaN zależy od ilości ładunku nagromadzonego na powierzchni próbki w danym okresie czasu. Ponadto zauważa, że efekt "nasylenia ładunkiem" w naświetlanym GaN jest nieodwracalny. Ponadto okazało się, że głębokość

widocznego na obrazach SEM obszaru nasyconego (1,7 - 2 mikrony) jest zgodna z maksymalną głębokością rozkładu uszkodzeń obliczoną przy użyciu programu SRIM. Tak więc metoda ta, w przypadku ewentualnego stosowania implantacji jonami He<sup>+</sup> w celu wytworzenia obszarów izolujących jest skuteczną i praktyczną metodą kontroli takich procesów w „technologii GaN”

W pracy [A6] habilitantka analizuje jak skład pierwiastkowy i domieszkowanie wpływa na kontrast DIVA w AlGaAs. Okazuje się, że w badanym materiale, kontrast DIVA nie pokrywa się z obliczeniami SRIM rozkładu defektów. Zmiana rezystywności związana jest także z poziomem domieszkowania i składem pierwiastkowym oraz z wieloma innymi czynnikami eksperymentalnymi takimi jak napięcie przyspieszające, prąd wiązki, czy szybkość skanowania. Ostatecznie, habilitantka podsumowuje, że kontrast w niskonapięciowym SEM oparty na mechanizmie ładowania próbki nie jest metodą ilościową i nie odzwierciedla wprost stopnia zdefektowania, a w dużym stopniu zależy od własności badanego materiału. Tym niemniej faktem jest, że proponowana metoda kontrastu DIVA może być bardzo użyteczna dla szybkiej oceny i porównania podobnych procesów technologicznych ze stosunkowo wysoką rozdzielczością przestrzenną. Ma to szczególne znaczenie w technologii GaN, gdzie nie istnieje metoda trawienia chemicznego ujawniająca obszary izolowane implantacją jonów He<sup>+</sup>. Należy podkreślić, że część tych prac była realizowana w ramach grantu NCN kierowanego przez habilitantkę.

Cykl publikacji poświęconych rozwojowi analiz jakościowych opartych na niskoenergetycznej skaningowej mikroskopii elektronowej, a szczególnie część poświęcona kontrastowi DIVA, oparty jest na niedawnych pracach habilitantki z lat 2017-2023 co w dużym stopniu tłumaczy stosunkowo niewielką ilość cytowań. Tym niemniej prace [A3, A4, A2] zostały opublikowane w bardzo cenionych w dziedzinie mikroanalizy czasopismach, takich jak *Ultramicroscopy* i *Microscopy and Microanalysis*. Wkład merytoryczny habilitantki w te prace jest wiodący. Prace [A1-A6] są w dużej mierze pionierskie i poświęcone rozwojowi metody badawczej co w polskich realiach nie jest częste. Ponadto, prace naukowe habilitantki zyskały uznanie w środowisku badaczy zajmujących się mikroanalizą, jak również zostały zauważone przez producentów mikroskopów elektronowych oraz uzyskały finansowanie z NCN. Badania te mają duże znaczenie praktyczne dla rozwoju technologii półprzewodnikowej. Z drugiej strony, pewien niedosyt budzi dosyć pobieżne potraktowanie rzeczywistej nanostruktury zniszczeń radiacyjnych. Habilitantka w dużym stopniu opiera lub konfrontuje wnioski z obserwacji SEM z symulacjami programem SRIM. Ciekawe byłoby powiązanie obserwowanych zmian kontrastu z identyfikacją rodzaju i rzeczywistego zasięgu zdefektowania danego materiału eksperymentalnie np. metodami TEM. Obszerniejsza dyskusja na ten temat pojawia się dopiero w publikacji [A6]

Na dorobek naukowy po doktoracie dr Doroty Józwiak składa się 89 publikacji. Publikacje habilitantki, poza tymi zgłoszonymi w ramach osiągnięcia habilitacyjnego, dotyczą kilku bloków tematycznych.

Pierwszym z nich są badania nad optymalizacją cienkowarstwowych ogniw słonecznych które dr Iwona Józwik prowadziła w ramach 7 miesięcznego stażu podoktorskiego w grupie prof. Mustafy Lemiti w Laboratorium Fizyki Materiałów Institut des Nanotechnologies de Lyon, INSA de Lyon we Francji, który obejmował okres od września 2006 r. do czerwca 2007 r.

Począwszy od 2008 roku i podjęciu pracy w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych (obecnie Instytut nosi nazwę Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki) w Warszawie zainteresowania naukowe dr Iwony Józwik zaczęły koncentrować się na badaniu zmian strukturalnych i zdefektowania radiacyjnego w

materiałach pod wpływem oddziaływania energetycznych jonów. Ten kierunek badań kontynuowała po podjęciu pracy w 2017 w Narodowym Centrum Badań Jądrowych. Poza badaniem materiałów półprzewodnikowych i warstw grafenowych, przedstawionych w osiągnięciu habilitacyjnym, prace te dotyczyły ceramik, polimerów i elastomerów, oraz stali ODS. By lepiej zrozumieć naturę uszkodzeń radiacyjnych w ceramikach dr Iwona Józwik poszerza swój arsenał stosowanych technik badawczych o techniki, obrazowania transmisyjnej mikroskopii elektronowej, a w szczególności technikę obrazowania w ciemnym polu pod niskim kątem (LAADF-STEM – Low Angle Annular Dark Field STEM), HR-STEM, spektrometrii z rozpraszaniem wstecznym Rutherforda (RBS/C) i wysokorozdzielczej dyfrakcji rentgenowskiej (HRXRD), katodoluminescencji i jonoluminescencję. W badaniach swych wykorzystuje również modelowanie komputerowe.

Badania materiałów ceramicznych zostały przeprowadzone we współpracy z Centre de Spectrometrie Nucleaire et de Spectrometrie de Masse, Orsay, w ramach projektu Polonium 2010 oraz Environmental Molecular Sciences Laboratory, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA w ramach EMSL Open Access Project (2010 - 2012). Wyniki przeprowadzonych prac zostały opublikowane w [D8-D13].

Badania związane z napromieniowaniem polimerów i elastomerów habilitantka prowadzi we współpracy z Instytutem Fizyki Wiązki Jonowej i Badań Materiałowych w Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Instytutem Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Piastowie oraz Instytutem Technologii Polimerów i Barwników Politechniki Łódzkiej.

Duża część badań dr Iwony Józwik jest realizowana w ramach kierowanych przez nią projektów badawczych Polonium i Sonata. Dr Iwona Józwik współpracuje z wieloma ośrodkami zagranicznymi z Francji, Niemiec, USA i krajowymi. Jej dokonania naukowe, wiedza i doświadczenie w badaniach z wykorzystaniem SEM znalazły uznanie, o czym świadczą liczne zaproszenia do wygłoszenia referatów, współpracy przy doskonaleniu metod badawczych z przemysłu, nagrody, w tym stypendium Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w uznaniu za wybitny dorobek naukowy młodego naukowca, który nie ukończył 35 roku życia.

W roku 2019 dr Iwona Józwik rozpoczęła pracę w Centrum Doskonałości NOMATEN w Narodowym Centrum Badań Jądrowych a od 2021 r. pełni funkcję kierownika Grupy Badawczej Charakteryzacji Materiałów w Centrum Doskonałości NOMATEN. Jej działalność naukowa opiera się na wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), techniki zogniskowanej wiązki jonów (FIB), dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD), spektrometrii promieniowania X z dyspersją energii (EDS) i ma na celu rozwój nowych materiałów odpornych na działanie czynników takich jak promieniowanie jonizujące, wysoka temperatura czy naprężenia wywołane ciśnieniem. Dr Iwona Józwik łączy przyszłe plany badawcze z wykorzystaniem możliwości nowo zainstalowanego w NCBJ zaawansowanego elektronowego mikroskopu transmisyjnego o bardzo dużej rozdzielczości, dysponującego szeregiem metod analitycznych i najnowszymi technologiami detekcji i obrazowania w skali atomowej. Dr Iwona Józwik zamierza również wykorzystać możliwości mikroskopów elektronowych działających NCBJ w zakresie badań wytrzymałościowych in -situ. Planowane badania z pewnością przyczynią się do lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w materiałach pod obciążeniem w warunkach napromieniowania i będą kluczowe dla bezpieczeństwa i rozwoju technologii reaktorów jądrowych planowanych do zainstalowania w Polsce.

Poza działalnością naukową Dr Iwona Józwik posiada również osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne oraz popularyzujące naukę. Prowadziła ćwiczenia z fizyki oraz laboratoria fizyczne na Politechnice Lubelskiej. Była opiekunem pracy magisterskiej, praktyk studenckich oraz pełniła funkcję promotora pomocniczego rozprawy doktorskiej inż. Anny Kosińskiej, na Wydziale Inżynierii Materiałowej PW. Prowadziła szkolenia z obsługi SEM-FIB dla pracownika ITME i NCBJ.

Przedstawiony do recenzji cykl publikacji stanowi osiągnięcie naukowe o znacznym wkładzie w rozwój zaawansowanych metod badania lokalnych zmian przewodnictwa materiałów i generalnie eksperymentalnych technik fizyki ciała stałego. Posiada wysokie walory naukowe oraz duże znaczenie praktyczne dla technologii półprzewodników i grafenu. Dorobek naukowy dr Iwony Józwik jest bogaty i dotyczy ważnych technologicznie i naukowo materiałów. Habilitantka wykazuje dużą aktywność badawczą prowadzoną we współpracy z wieloma ośrodkami w kraju i zagranicą, aktywnie uczestniczy w tworzeniu warsztatu badawczego, intensywnie rozwija swój arsenał metod badań strukturalnych, kieruje zespołem badawczym, jest rozpoznawalną specjalistką w dziedzinie mikroskopii SEM.

Podsumowując rozprawa habilitacyjna oraz dorobek naukowy spełniają wymogi ustawy a dr Iwona Józwik posiada pełne predyspozycje do samodzielnej pracy naukowej i w pełni zasługuje na uzyskanie stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych.