

prof. dr hab. Antoni Ciszewski  
Instytut Fizyki Doświadczalnej  
Wydział Fizyki i Astronomii  
Uniwersytet Wrocławski  
Pl. Maksa Borna 9  
50-204 Wrocław

## Ocena dorobku naukowego pana dra Benedykta R. Jany w związku z postępowaniem o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne UJ powołującą mnie na recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne przedstawiam pisemną ocenę dorobku naukowego pana dra Benedykta R. Jany po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych w roku 2011. Dorobek ten jest zawarty w 48 pracach opublikowanych w czasopiśmie specjalistycznym o światowej cyrkulacji, których tytuły umieszczone są w bazach danych Instytutu Informacji Naukowej w Filadelfii (Institute for Scientific Information). Prace te są wieloautorskie. Przedstawił je w odpowiednim wykazie stanowiącym dokument w niniejszym postępowaniu. Wyniki swoich badań z tego okresu pan dr Jany prezentował również w 23 doniesieniach konferencyjnych, z których 1 był referatem zaproszonym, 16 komunikatami przedstawianymi w formie referatu, a 6 stanowiły plakaty.

Ze wspomnianych 48 publikacji na osiągnięcie, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.), składa się cykl wydanych w latach 2014 – 2021 prac zatytułowany „Oddziaływanie atomów złota z powierzchniami półprzewodników jedno (Ge) i wieloskładnikowych (AlIII-BV) oraz przemiany fazowe im towarzyszące badane za pomocą technik mikroskopii elektronowej oraz narzędzi bazujących na Machine Learning”. Tematyka cyklu koncentruje się wokół badań nanokontaktów złota z powierzchniami półprzewodnikowymi. **Jest niewątpliwą zasługą Habilitanta, że do tych badań, obok standardowych technik SPM, zostały wprowadzone techniki mikroskopii elektronowej skaningowej i transmisyjnej oraz związane z nimi metody pomiarowe, a do analizy uzyskanych wyników narzędzia bazujące na nowoczesnych technikach uczenia maszynowego (Machine Learning). Pozwoliło to uzyskać informacje o zmianach chemicznych i strukturalnych zachodzących w obszarze nanokontaktów na poziomie atomowym.**

Pięć prac cyklu dotyczy cienkich warstw Au na powierzchni Ga(001) [H1-H4, H7], w szczególności morfologii tych warstw w zależności od ilości zdeponowanego Au i temperatury wygrzewania po osadzeniu, oraz przewodnictwa elektrycznego wytworzonych na drodze samoorganizacji nanostrukturalnych form morfologicznych. Wyniki pomiarów potencjometrycznych pokazały istnienie trzech kanałów przewodnictwa. Dwa z tych kanałów powstawały na powierzchni próbki. Jeden miał postać 3-wymiarowych klastrów/wysp, a drugi 1-wymiarowych atomowych drutów. Trzeci, dodatkowy kanał przechodził przez wyspy złota zagrzebane częściowo pod powierzchnią próbki. Badania TEM przekrojów poprzecznych

przygotowanych przez Habilitanta techniką FIB, bezpośrednio potwierdziły istnienie tego trzeciego kanału [H1, H2]. Badania dynamiki wzrostu 3-wymiarowych wysp/klastrów powstających na powierzchni próbki, wykonane za pomocą wysoko rozdzielczej mikroskopii SEM, pozwoliły wyznaczyć energię aktywacji na dyfuzję atomów złota po powierzchni próbki [H2]. Podobne badania wykonane bezpośrednio w mikroskopie SEM w warunkach "słabej próżni" (ciśnienie 3mbar H<sub>2</sub>O) pokazały, że wygrzewaniu próbki towarzyszy proces trawienia powierzchni, w którym elektrony są przenoszone z atomów Ge na metalowe klastry Au i dalej na H<sub>2</sub>O, co skutkuje zrywaniem wiązań Ge-Ge i w konsekwencji prowadzi do utleniania powierzchni [H3]. Badania struktury atomowej i składu chemicznego wysp oraz interfejsu wyspa/podłoże przeprowadzone metodami HR SEM-EBSD [H4] pokazały, że dla wysp powstałych poniżej temperatury eutektycznej dyfrakcja EBSD indeksowała się jako kubiczna Au fcc. Natomiast dla wysp uformowanych powyżej tej temperatury jako heksagonalna Au hcp. Ujawniły także istnienie dwóch populacji wysp o różnych orientacjach krystalograficznych. Atomowo rozdzielcze obrazy STEM-HAADF [H4, H7] potwierdziły te obserwacje ukazując po raz pierwszy atomową strukturę wewnętrzną wysp oraz granic faz w obrębie wyspy i między wyspą a podłożem. Dodatkowe badania składu chemicznego za pomocą techniki STEM EELS wykluczyły tworzenie się stopu Au-Ge. **Badania przeprowadzone w pracy [H4] pozwoliły wyznaczyć diagram fazy hcp złota w funkcji temperatury wygrzewania próbki. Uważam ten wynik oraz wyznaczenie parametrów struktury atomowej Au hcp za istotny wkład Habilitanta w rozwój wiedzy w dziedzinie fizyki ciała stałego.**

Pozostałe badania, składające się na oceniane tu osiągnięcie, zostały przedstawione w pracach [H5-H9]. Dotyczą oddziaływania atomów Au z powierzchniami półprzewodników z grupy AIII-BV (InSb, InAs, InP, GaSb, GaAs, GaP). Półprzewodniki te ze względu na swoje wyjątkowe właściwości, takie jak wysoka ruchliwość nośników oraz bezpośrednie pasmo zabronione, mają bardzo duży potencjał aplikacyjny. Użycie techniki SEM EDX wraz z obróbką Machine Learning do charakteryzacji składu chemicznego z nanostruktur pozwoliło przeprowadzić ilościową analizę składu chemicznego nanodrutów AuIn<sub>2</sub> na InSb [H5]. Badania HAADF-STEM i TEM EDX nanostruktur powstających podczas wygrzewania warstw Au na GaAs(001), w których dyfraktogramy EDX zostały poddane analizie techniką BSS Machine Learning z zastosowaniem Non-Negative Matrix Factorization pokazały, jak zmieniając temperaturę samoorganizacji warstwy Au można wpływać na morfologię i rozmiary tworzonych na powierzchni nanostruktur i kompozycję interfejsów między nimi a podłożem [H6]. Podobne badania przeprowadzone systematycznie dla warstwy Au o grubości 2ML na sześciu podłożach InSb, InAs, InP, GaSb, GaAs i GaP [8] ujawniły, że tworzenie się nanostruktur jest konsekwencją dyfuzji powierzchniowej i nukleacji adatomów powstających w wyniku zachodzących na powierzchni półprzewodników AIII-BV reakcji chemicznych indukowanych obecnością atomów Au. Dyfuzję atomów złota w głąb podłoża zaobserwowano jedynie w przypadku InSb. Zidentyfikowano te reakcje i oszacowano liczbę atomów Au potrzebną do uwolnienia 1 atomu metalu grupy AIII z podłoża. Badania pokazały, że na poziomie atomowym istnieją istotne różnice w oddziaływaniu złota z podłożami z grupy galowej i grupy indowej. Prace [H5, H6, H8] pokazują, że samoorganizacja atomów złota na powierzchniach półprzewodników AIII-BV może być metodą wytwarzania dobrze zdefiniowanych nanokontaktów i innych elementów współczesnej nanoelektroniki. Podobnie jak ostatnia praca cyklu [H9], w której pokazano, że powstające na powierzchni InP(001) nanostruktury AuIn<sub>2</sub> tworzą dwa typy interfejsu o przewodnictwie omowym lub Schottky-ego, w zależności

od orientacji względem podłoża. **Uważam, że prace [H5, H6, H8, H9] wnoszą istotny wkład w rozszerzenie wiedzy dotyczącej fizycznych podstaw inżynierii materiałowej.**

**Wartość naukową i oryginalność ocenianego cyklu prac znacznie podnosi wprowadzenie przez dra Jany do analizy wyników badań metod stosowanych w uczeniu maszynowym.** Z dużym sukcesem został rozwiązany problem mieszania się sygnałów pochodzących z różnych głębokości próbki przez zastosowanie do danych SEM EDX jednej z technik Machine Learning tzw. ślepej separacji sygnałów (BSS) w formie dekompozycji macierzowej non-Negative Matrix Factorization (NMF) [H5]. Wprowadzenie metod Machine Learning znacznie uprościło i zautomatyzowało analizę obrazów mikroskopowych HAADF STEM, pozwalając, w całości automatyczny sposób, wyznaczyć obszary występowania złota fcc oraz hcp, co było niezbędne do zbudowania wykresu fazowego Au hcp [H4, H7] i pozwoliło lepiej zrozumieć oddziaływanie Au-podłoże w innych badanych układach.

Z oświadczeń współautorów i Habilitanta wynika, że **we wszystkich pracach cyklu stanowiącego przedstawiane osiągnięcie naukowe miał on bardzo istotny a czasami wręcz kluczowy udział.** Używając techniki skoncentrowanej wiązki jonowej FIB przygotowywał próbki z przekrojów poprzecznych badanych materiałów do pomiarów TEM. Analizował i interpretował dane STEM EDX. Uczestniczył w dyskusjach związanych z analizą i interpretacją danych oraz planowaniem eksperymentów. Prowadził pomiary SEM EBSD z nanostruktur oraz analizował i interpretował dane, które pokazały istnienie struktury Au hcp. Uczestniczył w analizie i interpretacji danych HAADF STEM. Z tych danych wyznaczył parametry komórki Au hcp i struktury interfejsów w innych badanych układach. Rozwinął koncepcję i metody wykorzystania Machine Learning w prowadzonych badaniach. Brał udział w pracach nad koncepcją, metodologią i koordynacją badań oddziaływania złota z powierzchniami półprzewodników AIII-BV. Brał udział w przygotowywaniu manuskryptów publikacji. Często był autorem korespondencyjnym.

**Zamykając ocenę cyklu stwierdzam, że zawarty w nim materiał eksperymentalny jest bardzo wartościowy i interesujący naukowo. Na pewno wnosi istotny wkład w rozwój fizyki jako dyscypliny w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych.**

Pozostały oceniany tu dorobek naukowy Pana dra Jany jest również bardzo bogaty. Wchodzi do tego dorobku 13 prac poświęconych fizyce cząstek elementarnych, pozycje [7, 36, 37, 38, 40-48] w spisie artykułów opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora, oraz 24 prace dotyczące bardzo różnorodnych zagadnień z fizyki fazy skondensowanej, w szczególności fizyki powierzchni, oraz fizyki materiałów i nanomateriałów. Uważam, że uzyskany w tych badaniach dorobek jest duży i znaczący. **Moja opinia na temat wysokiej wartości naukowej prac dra Benedykta Jany, które nie weszły w skład ocenianego osiągnięcia naukowego, pokrywa się w pełni z opinią recenzentów rekomendujących je do druku w renomowanych czasopismach o zasięgu światowym. Przedstawioną w tych pracach tematykę badań uważam za ważną i aktualną a udział Habilitanta w dużej części badań tam zreferowanych za znaczący.**

Innym, w moim odczuciu **ważnym, wyróżnikiem wysokiej wartości działalności naukowej Habilitanta jest kierowanie projektami badawczymi.** Obecnie pan dr Jany kieruje grantem nr DEC-2020/04/X/ST5/00539 "Próba syntezy nowych faz metali typu hcp w procesie samoorganizacji indukowanej temperaturowo w skali nano" w ramach konkursu NCN Miniatura 4. **Do tej pory był kierownikiem w 5 grantach i wykonawcą w 6. Godnym**

**podkreślenia jest fakt, że przedstawione w cyku prac badania struktury atomowej interfejsu Au/Ga(001) wykonane za pomocą HAADF STEM w laboratorium EMAT na Uniwersytecie w Antwerpii, Belgia, w grupie Prof. Jo Verbeeck-a – jednym z najlepszych laboratoriów mikroskopii elektronowej na świecie – zostały sfinansowane z projektu pana dra Jany (20141212-Jany EU Grant Agreement 312483) uzyskanego w ramach grantu europejskiego ESTEEM2 (Integrated Infrastructure Initiative–I3). Badania samoorganizacji złota na powierzchni germanu były sfinansowane z dwóch grantów K/DSC/002042/2014 (w ramach MNiSzW Nr 7150/E-338/M/2014) oraz K/DSC/003656/2016 (w ramach MNiSzW Nr 7150/E-338/M/2016), a badania samoorganizacji złota na powierzchni półprzewodników z grupy AIII-BV z grantu K/DSC/004340/2017 (w ramach MNiSzW Nr 7150/E-338/M/2017). Wszystkimi tymi grantami kierował pan dr Jany.**

**Na dojrzałość naukową Habilitanta wskazuje bogata współpraca z innymi zespołami badawczymi.** W okresie 2006-2009 odbył długoterminowy staż naukowy w IKP Forschungszentrum-Juelich w celu realizacji badań niezbędnych do pracy doktorskiej. Pokłosiem tego jest pewnie wspomniane wyżej 13 prac z fizyki cząstek elementarnych. W latach 2013-2019 odbył kilka krótkich staży oraz szkoleń naukowych: w Instytucie Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie, w University of Antwerp (trzy pobyty), w Politechnice Śląskiej, w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, w firmie AMETEK EDAX, (zaawansowane szkolenie z techniki EBSD) oraz na warsztatach z mikroanalizy w ramach workshopu EMAS 2013. Ciągłe prowadzi badania w ramach współpracy z Forschungszentrum-Juelich, Friedrich Schiller University Jena i Montanuniversität Leoben (Austria). **Wynikiem tej współpracy jest 8 wspólnych publikacji.** Obecnie nawiązał współpracę międzynarodową z grupą prof. Richarda A. Wilhelma z Institute of Applied Physics, TU Wien, Austria.

**Podsumowując stwierdzam, że dorobek i osiągnięcia naukowe dra Benedykta Jany spełniają ustawowe warunki wymagane od osób ubiegających się o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego zgodnie z art. 219 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.). Z pełnym przekonaniem rekomenduję Radzie Dyscypliny Nauki Fizyczne UJ nadanie panu Doktorowi tego stopnia.**

Wrocław, 25 maja, 2022 r.



Prof. dr hab. Antoni Ciszewski