

Prof. dr hab. Leszek Kępiński
Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN
ul. Okólna 2, 50-422 Wrocław

Wrocław, 16.12.2015

Recenzja
osiągnięcia naukowego w postaci cyklu publikacji pt: „Struktura krystaliczna
i związane z nią własności fizyczne warstw grafenowych,
zsyntetyzowanych na powierzchniach polarnych SiC”
oraz aktywności naukowej dr Jolanty Agnieszki Borysiuk.

Informacje ogólne:

Dr Jolanta Agnieszka Borysiuk jest zatrudniona na stanowisku adiunkta w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie oraz na stanowisku starszego specjalisty na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Dr Borysiuk ukończyła studia magisterskie na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej w roku 1995. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskała na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej w roku 2000. Rozprawa doktorska miała tytuł „Badania defektów strukturalnych w wysokodomieszkowanym półprzewodniku GaAs:Te” a jej promotorem był Prof. dr hab. Jan A. Kozubowski. W latach 2000 – 2001 odbywała staż podoktorski na Uniwersytecie Erlangen-Norynberga (Niemcy) na Wydziale Materials Science. W latach 2002 – 2005 dr Borysiuk była zatrudniona jako starszy specjalista i adiunkt w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN, a w latach 2006 – 2010 jako starszy specjalista inżynieryjno-techniczny i adiunkt w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych.

Ocena całego dorobku naukowego i aktywności naukowej:

Główna działalność naukowa dr Jolanty Borysiuk wiąże się z wykorzystaniem technik transmisyjnej mikroskopii elektronowej do badań realnej struktury złożonych, warstwowych struktur krystalicznych, ważnych dla technologii mikroelektronicznych. W trakcie studiów doktoranckich na Politechnice Warszawskiej badania Habilitantki dotyczyły defektów strukturalnych w arsenku galu domieszkowanym tellurem oraz w azotku galu domieszkowanym magnezem. Prace badawcze nad realną strukturą krystalicznych warstw azotków metali V grupy dr Borysiuk kontynuowała w trakcie stażu podoktorskiego na Uniwersytecie Erlangen-Norynberga, a następnie w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN. Osiągnięcia naukowe Habilitantki i Jej biegłość w wykorzystaniu technik transmisyjnej mikroskopii elektronowej owocowały współpracą przy realizacji kilku projektów badawczych, w tym

Strategicznym Programie Rządowym „Rozwój Niebieskiej Optoelektroniki” realizowanym w Centrum Badań Wysokociśnieniowych oraz Programie FlowGraf Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Dr Borysiuk współpracowała również, jako specjalista od badań TEM, z wieloma grupami badawczymi. Warto wspomnieć prace dotyczące nanokapsułek Fe otoczonych C (grafitem), we współpracy z grupą prof. dr. hab. Huberta Lange z Uniwersytetu Warszawskiego opublikowane m.in. w Carbon (45 cytowań) czy prace dotyczące kropek kwantowych InAs/GaAs z grupą dr. hab. Adama Babińskiego z Uniwersytetu Warszawskiego opublikowane m. in. w Applied Physics Letters (20 cytowań).

Opublikowany dorobek naukowy dr Borysiuk jest obszerny. Obejmuje on 68 publikacji w recenzowanych czasopismach naukowych i 2 rozdziały w książkach. Spośród 68 publikacji część została opublikowana w bardzo dobrych czasopismach o wysokim współczynniku wpływu IF: 1 praca posiada $IF = 11,8$, a 9 prac $IF > 3$. Sumaryczny IF wszystkich prac wynosi 130,70. Prace te uzyskały łącznie 674 cytowań, a indeks Hirscha h wynosi 15. Warto podkreślić, że zdecydowana większość publikacji (65) powstała po uzyskaniu stopnia doktora, co wskazuje to na ciągły, intensywny rozwój naukowy Habilitantki.

Dr Borysiuk uczestniczyła w 12 międzynarodowych kongresach i konferencjach naukowych, na których przedstawiła 14 prezentacji posterowych i wygłosiła jeden referat.

Habilitantka wykazała się także dużą aktywnością w zakresie pozyskiwania środków finansowych na badania. Była kierownikiem 2 oraz wykonawcą w 12 projektach badawczych. Jest także współautorem jednego zgłoszenia patentowego.

Podsumowując, mogę stwierdzić, że Habilitantka posiada wartościowy, udokumentowany dorobek naukowy w dziedzinie fizyki. Jest także uznanym autorytetem w dziedzinie zastosowań transmisyjnej mikroskopii w badaniach mikrostruktur krystalicznych.

Ocena głównego osiągnięcia naukowego:

Dr Jolanta Borysiuk przedłożyła rozprawę habilitacyjną pt. „Struktura krystaliczna i związane z nią własności fizyczne warstw grafenowych, zsyntetyzowanych na powierzchniach polarnych SiC”, którą stanowi cykl 7 publikacji z lat 2009 – 2014. Rozprawa zawiera także autorskie omówienie wyników uzyskanych w w/w cyklu publikacji, sporządzone w języku polskim i angielskim. Wszystkie prace z cyklu opublikowane zostały w dobrych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym o współczynniku wpływu (IF) od 1.23 do 3.66. Łączna liczba cytowań tych prac wynosi 100 (w tym 16 autocytaowań). Najwięcej cytowań (41) uzyskała publikacja H1 z roku 2009. Cykl 7 wybranych prac stanowi zwartą całość podsumowującą wkład Habilitantki w rozwój wiedzy na temat zależności między realną strukturą, a właściwościami fizycznymi warstw grafenowych utworzonych metodą sublimacji krzemu na powierzchniach kryształu 4H SiC. Tematyka badań jest

bardzo aktualna ze względu na ciekawą i ciągle niepoznaną do końca fizykę takich układów, a także w związku z poszukiwaniami nowych materiałów na szybkie planarne układy mikroelektroniczne. Analiza przedstawionych prac pokazuje, że wyniki uzyskane przez Dr Borysiuk wniosły znaczący wkład w rozwój wiedzy na temat mikroskopowej struktury warstw grafenowych na powierzchniach polarnych (0001) oraz (000-1) kryształu SiC o strukturze heksagonalnej typu 4H.

Podstawową techniką doświadczalną stosowaną przez dr Borysiuk dla osiągnięcia założonego celu była transmisyjna mikroskopia elektronowa (TEM). Jest to technika optymalna dla tego typu badań, lecz uzyskanie zadowalających wyników uwarunkowane jest właściwym przygotowaniem preparatów. Dr Borysiuk poradziła sobie znakomicie z tym zadaniem, otrzymując zarówno przekroje poprzeczne próbek metodą klasyczną (bez użycia FIB), jak i zdejmując warstwy grafenowe z podłoża.

Charakterystyczną cechą kryształu 4H SiC jest występowanie dwóch różnych powierzchni prostopadłych do osi sześciokrotnej. Jedna z nich (0001) zawiera na powierzchni atomy krzemu, a druga (000-1) atomy węgla. Skutkiem tego struktura warstw grafenowych powstających na tych powierzchniach w wyniku sublimacji z kryształu SiC atomów Si jest różna. Badaniom warstw grafenowych na powierzchni (0001) („krzemowej”), poświęcone są prace [H1] i [H2] z cyklu stanowiącego rozprawę. Jednym z wartościowszych wyników uzyskanych w tych pracach jest udowodnienie, za pomocą bezpośredniego obrazowania TEM, istnienia warstwy buforowej na granicy SiC – grafen. Obecność tej warstwy (odległej od powierzchni SiC ~ 0.2 nm) była postulowana wcześniej na podstawie pomiarów spektroskopowych, lecz praca H1 była jedną z pierwszych potwierdzających ten fakt za pomocą obrazowania bezpośredniego. W tym samym roku ukazała się praca Norimatsu [W. Norimatsu, M. Kusunoki, Chem. Phys. Lett., 468 (2009) 52–56] zawierająca podobne obserwacje HRTEM dla układu 6H SiC (0001) – grafen. W pracy H1 zbadano również strukturę warstw węglowych na schodkowej powierzchni SiC odchylonej o 4° od osi [0001]. Interesującym wynikiem było pokazanie za pomocą obrazowania HRTEM, że warstwy węglowe zachowują ciągłość na stopniach i tarasach, co może mieć znaczenie dla możliwych zastosowań. Z drugiej strony, naprężenia występujące w miejscach stopni generują dyslokacje w warstwie grafenowej.

Praca H2 dotyczy badań zmian struktury warstw grafenowych na powierzchni 4H SiC(0001) pod wpływem oddziaływania z wodorem w wysokich temperaturach. Udział Habilitantki w tej pracy nie był wiodący, lecz uzyskane przez Nią wyniki badań HRTEM stanowiły istotne potwierdzenie efektu interkalacji wodoru w przestrzenie między warstwami grafenowymi. Warto zaznaczyć, że były to jedne z pierwszych obserwacji HRTEM takich układów. W wyniku procesu wodorowania obserwowano wzrost odległości między płaszczyznami grafenowymi (co dowodzi absorpcji wodoru), a ponadto stwierdzono zanik warstwy buforowej na granicy SiC- warstwa grafenowa. Zanik warstwy

buforowej daje się wyjaśnić przez dyfuzję wodoru do granicy międzyfazowej SiC – grafen i wysycanie zerwanych na powierzchni wiązań kowalencyjnych Si. Dzięki temu wiązanie pierwszej warstwy grafenu z powierzchnią SiC osłabia się i wzrasta jej odległość od powierzchni.

W pracy H3 przedstawiono jedno z pierwszych wyników na temat mikrostruktury warstw grafenowych powstających na powierzchni 4H-SiC (000-1) (węglowej”). Inaczej niż na powierzchni (0001), powstające struktury węglowe mogą w tym wypadku zawierać nawet kilkanaście warstw grafenowych, które są słabo związane z powierzchnią. Obserwacje HRTEM przedstawione w pracy [H3] pokazały, że jest to wynikiem braku buforowej warstwy węgla związanej wiązaniami kowalencyjnymi z powierzchnią SiC. Interpretacja eksperymentalnych obrazów HRTEM została poparta symulacjami komputerowymi wykonanymi dla różnych modeli granicy międzyfazowej.

Ważnym problemem naukowym dyskutowanym w pracach H3 i H4 jest określenie sposobu wzajemnego usytuowania warstw grafenowych powstających na powierzchni 4H-SiC (000-1). Dla rozwiązania tego zagadnienia Habilitantka wykorzystała obrazowanie HRTEM wspomagane symulacjami komputerowymi i wykazała, że prócz heksagonalnego uporządkowania AB (charakterystycznego dla grafitu) występuje również uporządkowanie AA oraz ABC. Obliczenia DFT pokazały, że sposób ułożenia warstw decyduje o charakterze przewodnictwa elektrycznego i ma istotne znaczenie technologiczne. W szczególności uporządkowanie AA charakteryzuje się liniową zależnością dyspersyjną nawet w obecności podłoża, co jest kluczową zaletą z punktu widzenia zastosowań dla szybkich układów elektronicznych. W tym miejscu mam jednak kilka uwag krytycznych. W dyskusji wyników TEM pominięto problem wpływu wysokoenergetycznej wiązki elektronów (300 keV) na strukturę warstw grafenowych, choć istnieją doniesienia, iż takiego wpływu nie można wykluczyć. Po drugie, wykorzystanie symulacji komputerowych do interpretacji obrazów HRTEM wymaga dużej ostrożności, a zwłaszcza zastosowania prawidłowych danych wejściowych. W przedstawionych pracach brak jest niestety informacji na temat pomiaru (oceny) rzeczywistej grubości próbki w obszarze obrazowanym. Wątpliwości budzi również wstępna obróbka obrazów wykorzystująca filtrację FFT. W przypadku obszarów zawierających kilka warstw grafenowych identyfikacja refleksów „pseudodyfrakcyjnych” odpowiadających za różne uporządkowanie warstw jest trudna i filtrowanie FFT może być ryzykowne.

Badania dr Borysiuk dostarczyły również nowych informacji na temat mechanizmu zarodkowania i wzrostu warstw grafenowych na powierzchni SiC w wyniku sublimacji krzemu ([H5 i H7]). Zbadano w szczególności wpływ stanu powierzchni kryształu (obecność stopni atomowych) na generację defektów strukturalnych w warstwach. Ciekawym pomysłem jest wykorzystanie schodkowej powierzchni SiC odchylonej o 8° od osi [0001], o kontrolowanej zawartości stopni. Przedstawiony mechanizm zarodkowania wyjaśnia między innymi obecność licznych domen o różnej orientacji oraz

związanych z tym granic międzydomenowych. Do analizy struktury domenowej wielowarstw grafenowych Habilitantka wykorzystwała z powodzeniem obserwacje HRTEM typu „plane-view”, określając zarówno wielkość domen jak ich wzajemną orientację. W tym celu wykorzystwała z powodzeniem analizę prążków moiré wynikających z nakładania się sąsiednich domen.

Wyniki badań zebrane w cyklu prac [H1-H7] pokazały ważną i cenną cechę dr Borysiuk jako organizatora projektów badawczych, a mianowicie umiejętność łączenia pracy doświadczalnej z zaawansowanymi obliczeniami teoretycznymi, wykorzystywanymi zarówno do interpretacji wyników jak i przewidywania właściwości badanych układów.

Opisane powyżej, najważniejsze wyniki naukowe uzyskane przez dr J. Borysiuk i przedstawione w rozprawie habilitacyjnej zostały opublikowane w uznanych czasopismach naukowych z dziedziny fizyki i niewątpliwie zostały poddane rzetelnej ocenie merytorycznej przez kompetentnych recenzentów. Fakt ten, jak również dostrzeżenie tych prac przez społeczność naukową (100 cytowań) oraz zaproszenie dr Borysiuk do napisania artykułu przeglądowego w jednym z tomów Graphene Science Handbook (wyd. CRC Press Taylor and Francis Group, 2016), potwierdza moją opinię, że dorobek Habilitantki jest wartościowy oraz dotyczy bardzo aktualnych zagadnień eksperymentalnych i teoretycznych związanych z realną strukturą warstw grafenowych powstających na powierzchniach SiC.

Moją powinnością jako recenzenta rozprawy habilitacyjnej jest także ocena wkładu Habilitantki we wspólnie przeprowadzonych i opublikowanych badaniach. Wszystkie prace z cyklu H1 – H7 są wieloautorskie i mają od trzech do ośmiu autorów. Do wniosku habilitacyjnego dołączone są oświadczenia współautorów wskazujące ich wkład do poszczególnych publikacji, a także procentowy udział Habilitantki w powstaniu prac dokonany przez nią samą. Analiza tych danych wykazuje jednoznacznie, iż w sześciu z nich [H1, H3-H7] dr Borysiuk pełniła rolę wiodącą (w pięciu z nich była również pierwszym autorem i autorem korespondencyjnym).

Uważam, że wartość naukowa wyników przedstawionych w rozprawie jest znacząca i wzbogaciły one istotnie stan wiedzy o warstwach grafenowych na powierzchni kryształów SiC.

Ocena dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej:

Dr Jolanta Borysiuk posiada udokumentowany dorobek dydaktyczny. Sprawowała opiekę nad jednym doktorantem w charakterze promotora pomocniczego (praca doktorska mgr. Jakuba Sołtysa pt. „Modelowanie własności fizycznych i wzrostu jedno i wielowarstwowego grafenu, izolowanego oraz na powierzchniach SiC” obroniona w roku 2014). Prowadziła także przez wiele lat wykłady z zastosowań mikroskopii elektronowej w kryminalistyce dla studentów studiów podyplomowych Uniwersytetu i Politechniki Warszawskiej.

Warta podkreślenia jest działalność ekspercka Habilitantki jako recenzenta krajowych i zagranicznych projektów badawczych oraz jako recenzenta prac w uznanych czasopismach naukowych (np. ACS: Nano, ACS: Applied Materials & Interfaces, Elsevier: Materials Chemistry and Physics).

Dr. J. Borysiuk prowadzi intensywną współpracę naukową z wieloma ośrodkami naukowymi na kraju i za granicą ściecie uczestnicząc w realizacji 12 projektów badawczych oraz w sieciach i konsorcjach naukowych.

Za swoją działalność naukową, w szczególności za zainicjowanie w Polsce optycznych i strukturalnych badań grafenu, Habilitantka uzyskała w roku 2010 nagrodę Dziekana Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Wnioski końcowe:

Podsumowując moje powyższe oceny osiągnięć naukowych, dydaktycznych i organizacyjnych Habilitantki, stwierdzam, iż dr Jolanta Borysiuk:

1. prowadzi badania naukowe na wysokim poziomie, o czym świadczą liczne prace opublikowane w uznanych czasopismach międzynarodowych z dziedziny fizyki oraz liczne cytowania tych prac przez innych badaczy;
2. uzyskała wartościowe wyniki wnoszące elementy nowości naukowej z zakresu badań podstawowych;
3. prezentowała wyniki swoich badań na międzynarodowych konferencjach naukowych;
4. odbyła staże naukowe w uznanych, międzynarodowych zespołach badawczych;
5. ma doświadczenie dydaktyczne jako wykładowca oraz opiekun naukowy;
6. potrafi organizować działalność naukową, wykazując aktywność w zdobywaniu środków na badania;
7. zdobyła uznanie jako specjalista w zakresie swojej specjalności, uczestnicząc w realizacji wielu projektów badawczych i pełniąc funkcję recenzenta czasopism.

Uważam więc, że spełniła Ona wymagania stawiane kandydatom ubiegającym się o stopień doktora habilitowanego określone w obowiązujących przepisach (ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki -Dz.U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.- oraz rozporządzenie ministra nauki i szkolnictwa wyższego z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego).

Zgłaszam zatem wniosek do Rady Naukowej Instytutu Fizyki PAN o dopuszczenie dr Jolanty Borysiuk do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

