



**Prof. dr hab. Zbigniew R. Żytkiewicz**  
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk  
**Oddział ON-4 Fizyki i Technologii Nanostruktur**  
**Półprzewodników Szerokoprzerwowych**  
02-668 Warszawa, Al. Lotników 32/46, Polska  
TEL: (+48)(+22) 116 3363; FAX: (+48)(+22) 847 52 23  
E-MAIL : [zytkie@ifpan.edu.pl](mailto:zytkie@ifpan.edu.pl); Web site: [www.ifpan.edu.pl](http://www.ifpan.edu.pl)

Warszawa, 17.01.2012

### Ocena osiągnięcia naukowego i istotnej aktywności naukowej

dr. Sławomira Kreta

Zgodnie z art. 16 ust. 2 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym w postępowaniu habilitacyjnym ocenie podlegają „osiągnięcia naukowe i artystyczne, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiące znaczny wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej” oraz „istotna aktywność naukowa lub artystyczna” habilitanta. Poniżej przedstawiam moją ocenę działalności dr. Sławomira Kreta.

#### Ocena osiągnięcia naukowego

Jako swe osiągnięcie naukowe zatytułowane „Ilościowa transmisyjna elektronowa mikroskopia wysokorozdzielcza w fizyce i technologii heterostruktur półprzewodnikowych” dr Kret przedstawił jednotematyczny zestaw 13 oryginalnych prac naukowych opublikowanych w latach 2000 – 2010 w *J. Phys. Cond. Mat.* (2 prace), *J. Microscopy* (2 prace) i po jednej pracy w *Phil. Mag.*, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, *Diamond and Rel. Materials*, *Mat. Sci. Eng.*, *J. Appl. Phys.*, *J. Alloys & Comp.*, *Mat. Chemistry and Physics*, *Nanotechnology* i *Phys. Stat. Sol. A*. Całkowita liczba cytowań prac składających się na rozprawę to 121, z czego 64 przypada na pracę H8, najlepiej cytowaną w dorobku Habilitanta. Wszystkie omawiane prace są wieloautorskie, w ośmiu z nich dr Kret jest pierwszym autorem, a w trzech drugim. W dołączonych oświadczeniach współautorzy precyzyjnie określają swój wkład do ocenianych publikacji. Jednoznacznie wskazują też na dr Kreta jako na inicjatora podjętych badań oraz na jego dominujący udział w sformułowaniu problemu naukowego, wyborze metodyki badań, ich przeprowadzeniu i opracowaniu wyników.

Tematycznie wszystkie publikacje będące przedmiotem rozprawy dotyczą opracowania i wykorzystania metod analizy i interpretacji wyników wysokorozdzielczej mikroskopii elektronowej pozwalających na uzyskanie ilościowych informacji o lokalnych wartościach podstawowych parametrów sieci krystalicznej materiałów półprzewodnikowych grupy II-VI i III-V i wykonanych z nich heterostruktur. Tak uzyskane informacje są następnie konfrontowane z modelami teoretycznymi zjawisk fizycznych lub stanowią dane wejściowe dla takich modeli. To bardzo ambitne zadanie w czasach gdy w większości prac doświadczalnych technika TEM wykorzystywana jest jedynie do prostej obserwacji defektów sieci krystalicznej.

Prace [H1] i [H2] rozprawy poświęcone są opracowaniu nowej techniki badania układów dyslokacji poprzez ilościową analizę obrazów HRTEM. Metoda ta polega na lokalnym pomiarze przemieszczeń płaszczyzn atomów w dwóch różnych kierunkach krystalograficznych pozwalając otrzymać dwuwymiarowy tensor dystorsji sieci. W pracach [H1] i [H2] metoda ta zastosowana jest do analizy układu dyslokacji niedopasowania w heterostrukturach ZnTe/CdTe na podłożach GaAs. Problem relaksacji naprężeń w niedopasowanych sieciowo heterostrukturach półprzewodnikowych jest niezwykle istotny, zarówno z punktu widzenia badań podstawowych jak i dla praktyki technologicznej. Od lat wiadomo, iż wobec częstego braku podłoża dopasowanych sieciowo, optymalnym sposobem relaksacji niedopasowania sieciowego byłoby wytworzenie na granicy podłoże/bufor odpowiednio gęstej regularnej siatki dyslokacji niedopasowania (np. dla struktury sfalerytu dyslokacji 90 stopniowych typu Lomera). Pozwalałoby to na efektywną redukcję naprężeń i gęstości dyslokacji przechodzących w warstwie buforowej. W literaturze zaproponowano wiele rozwiązań technologicznych prowadzących do otrzymywania określonych typów dyslokacji, ale potrzeba też szybkiej metody analizującej w skali nanometrowej układy dyslokacji na heterogranicy i pozwalającej korelować wyniki z pomiarami w skali makro (np. XRD). W tym sensie omawiane prace dr Kreta prowadzące do analizy wektora Burgersa *on line* w trakcie pomiarów HRTEM są niezwykle cenne.

Zestaw prac [H3] – [H6] poświęcony jest wykorzystaniu ilościowej obróbki zdjęć HRTEM w połączeniu z procedurami modelowania numerycznego do analizy błędów ułożenia, dyslokacji przenikających i granic nisko-kątowych w warstwach GaN na podłożach Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lub SiC. Powstanie tych defektów wiązane jest z trójwymiarowym charakterem wzrostu w

początkowym jego etapie wymuszonym poprzez niedopasowanie sieciowe warstwy GaN z podłożem. W pracy [H3] dr Kret pokazuje, że pole naprężeń powstające w trakcie koalescencji wysp GaN może prowadzić do generacji pryzmatycznych błędów ułożenia z dyslokacjami w płaszczyźnie heterogranicy oraz szczegółowo analizuje strukturę takich defektów. W tej, jak i w kolejnych pracach [H4] – [H6], Habilitant pokazuje, że ze względu na niepełną relaksację naprężeń w otoczeniu defektu obserwowane rdzenie dyslokacji znacznie odbiegają od konfiguracji atomów przewidzianych równowagowymi modelami teoretycznymi. W szczególności, wyniki obliczeń z pracy [H5] potwierdzają, że silne oddziaływanie pomiędzy gęsto ułożonymi dyslokacjami może być przyczyną nierównowagowej struktury atomowej ich rdzeni.

Ponieważ azotki metali grupy III są kryształami piezoelektrycznymi pojawia się pytanie o wpływ lokalnych naprężeń wokół liniowych i planarnych defektów sieci krystalicznej na ich właściwości elektryczne. Dr Kret zajmuje się tym problemem w pracy [H6], w której wykorzystuje obrazy HRTEM do pomiaru pola dystorsji sieci wokół dyslokacji krawędziowej w GaN, a następnie metodami numerycznymi określa wielkość potencjału piezoelektrycznego związanego z tymi odkształceniami. Okazuje się, że ten wkład jest niewielki w porównaniu z całkowitym potencjałem defektu, co oznacza, że źródłem jego ładunku elektrycznego są raczej zerwane wiązania i/lub atomy domieszki dekorujące dyslokację. To bardzo ładny eksperyment, możliwy jedynie wówczas, gdy dobrze dopracowana jest technika ilościowej analizy lokalnej deformacji sieci krystalicznej z obrazów TEM.

Znaczna część prac rozprawy [H7]-[H12] związana jest z wykorzystaniem techniki TEM do ilościowej analizy składu chemicznego oraz jego fluktuacji w studniach kwantowych (In,Ga)N. To niezwykle ważne zagadnienie związane z szeroką debatą na temat przyczyn wysokiej wydajności świecenia diod GaN/InGaN na podłożach szafirowych, pomimo iż zawierają one bardzo dużo dyslokacji (gęstość  $\sim 10^9$ - $10^{10}$  cm<sup>-2</sup>) będącymi centrami rekombinacji niepromienistej. Powszechnie uważa się, że wydajna luminescencja ze studni InGaN wynika z lokalizacji elektronów i dziur z dala od dyslokacji, a tworzenie lokalnych minimów potencjału związanych z obecnością w studni klastrów bogatych w ind jest jednym z możliwych mechanizmów takiej lokalizacji nośników. Stąd precyzyjny pomiar rozkładu zawartości In w warstwach InGaN, opracowanie możliwości jego kontroli oraz korelacja

wyników z własnościami optycznymi takich warstw są niezwykle istotne zarówno z poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia. Wykorzystanie w tym celu techniki TEM jest bardzo obiecujące gdyż w jednym eksperymencie możliwe jest wydzielenie innych, oprócz fluktuacji składu, czynników wpływających na własności luminescencyjne studni InGaN. W szczególności, możliwa jest dokładna analiza geometrii studni (szerokość i jej zmiany przestrzenne, jakość granic rozdziału studnia/bariera), powtarzalność właściwości w układach studni kwantowych czy charakterystyka strukturalna pozostałych elementów obszaru aktywnego. Z drugiej strony, uwzględnić trzeba wiele zjawisk wpływających na zniekształcenie informacji zapisanej w obrazach TEM wynikających z procesów rozpraszania elektronów w niedoskonałych kryształach, w tym deformację sieci krystalicznej w cienkiej folii preparatu, przebudowę sieci krystalicznej wywołaną interakcją z intensywną wiązką elektronową czy też efekt uśredniania informacji w kierunku padającej wiązki.

Prace [H7] i [H8] poświęcone są zastosowaniu pomiaru dystorsji sieci krystalicznej na obrazach HRTEM do określenia koncentracji indu w wielostudniach kwantowych InGaN/GaN otrzymywanych technikami MOVPE i MBE. Za istotne osiągnięcie tych prac uważam opracowanie procedur numerycznych pozwalających zrekonstruować stan odkształcenia w próbce TEM, tzn. uwzględnić deformację sieci wynikającą z realnej geometrii cienkiego przekroju próbki. Dzięki temu możliwe jest wyselekcjonowanie z obrazów TEM informacji związanej z deformacją sieci wynikającą ze składu chemicznego próbki i poprzez zastosowanie prawa Vegarda pomiar bezwzględnej koncentracji indu w studniach. Uzyskane wyniki pokazują niejednorodny przestrzenny rozkład składników i obecność w studniach nanometrowych klasterów bogatych w In. Ich skład i rozmiary zależą od techniki wytwarzania warstw co jest zrozumiałe ze względu na zupełnie różne temperatury wzrostu stosowane w technikach MOVPE i MBE. Rozwinięciem tych badań są prace [H9] i [H10] poświęcone modelowaniu trójwymiarowych klasterów bogatych w ind zagrzebanych w studni InGaN i symulowaniu wielowiązkowych obrazów HRTEM z uwzględnieniem dynamicznych efektów rozpraszania elektronów.

Za istotne osiągnięcie dr Kreta uważam pokazanie, że InGaN jest materiałem bardzo wrażliwym na oddziaływanie z wiązką elektronową i jego lokalny skład chemiczny może być modyfikowany w trakcie pomiaru TEM (prace [H11] i [H12]). W szczególności, w InGaN pojawiać się mogą wydzielienia bogate w ind, których obecność maskuje naturalne zjawiska

segregacji In zachodzące w trakcie wzrostu. Habilitant określa parametry pomiaru TEM (czas ekspozycji, natężenie prądu wiązki, etc.) przy których efekt ten nie zaburza jeszcze istotnie struktury obserwowanej próbki. Pokazuje również, że w odróżnieniu od trójwymiarowych klastrów bogatych w ind zagrzebanych w studni InGaN, generowane wiązką elektronową wydzielenia powstają na powierzchni, a nie w objętości preparatu.

Chcę podkreślić, że badania prowadzone przez Habilitanta dostarczają wielu informacji niezwykle cennych dla technologów krystalizujących badane struktury epitaksjalne. Przykładowo, pokazanie zjawiska rozdyfundowania górnej granicy studni kwantowej InGaN spowodowanego podnoszeniem temperatury podczas wzrostu bariery (praca [H12]) doprowadziło do opracowania technologii, w której przed wzrostem bariery studnia kwantowa pokrywana jest cienką warstwą GaN krystalizowaną w niższych temperaturach. Ważnym osiągnięciem jest korelacja bezwzględnych wartości koncentracji indu i parametrów wielostudni InGaN/GaN otrzymanych techniką TEM z pomiarami rentgenowskimi [H11], co pozwala na wykorzystanie dyfraktometrii rentgenowskiej do wstępnej, szybkiej analizy otrzymywanych struktur. W końcu pomiary profilu składu osiowych nanodrutów ZnTe/CdTe i detekcja obszaru przejściowego na granicy obu materiałów (praca [H13]) są ważne dla opracowania technologii wzrostu kropek kwantowych CdTe zagrzebanych w drutach ZnTe.

Podsumowując, przedstawiony zestaw publikacji oceniam bardzo wysoko. Zawierają one cenne wyniki doświadczalne wraz z dogłębną ich interpretacją. Chcę podkreślić wielką dociekliwość Habilitanta precyzyjnie analizującego elementy stosowanej techniki doświadczalnej i ich wpływ na uzyskiwane wyniki. Warte podkreślenia są duża wiedza Habilitanta w dziedzinie przedmiotu i znakomite opanowanie warsztatu doświadczalnego. Nie mam wątpliwości, że dr Kret jest ekspertem w dziedzinie wykorzystania techniki TEM w fizyce i technologii heterostruktur półprzewodnikowych. Uważam, że przedłożony przez dr. S. Kreta zbiór publikacji stanowi dobrą podstawę do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.

Ocena istotnej aktywności naukowej

Aktywność naukowa dr Sławomira Kreta koncentruje się na rozwijaniu metod analizy i interpretacji wysokorozdzielczej mikroskopii elektronowej pozwalających na uzyskanie ilościowych informacji o lokalnych wartościach podstawowych parametrów sieci krystalicznej szeregu ważnych materiałów półprzewodnikowych i wykonanych z nich heterostruktur.

Habilitant zainteresował się tą tematyką w okresie studiów doktoranckich prowadzonych dzięki stypendium doktoranckiego rządu francuskiego w laboratorium LPS-ESPCI w Paryżu od roku 1993. Oceniając, na podstawie dostarczonej mi dokumentacji, dorobek dr Kreta nie mam wątpliwości, że jest on w pełni dojrzałym pracownikiem naukowym i zasługuje na tytuł doktora habilitowanego. Przekonują mnie o tym następujące fakty:

1. bardzo duży dorobek publikacyjny Habilitanta: całkowita ilość prac to 97, z czego aż 91 opublikowanych po 1998 roku, gdy uzyskał on stopień doktora. Daje to bardzo wysoką średnią ponad 6 prac rocznie. To znakomity wynik, tym bardziej, że duża część prac ukazała się w najbardziej prestiżowych czasopismach: 5 prac w Appl. Phys. Lett., 5 prac w J. Appl. Phys., 2 prace w Nano Letters, 5 prac w Nanotechnology, itd. Zdecydowana większość prac dr Kreta po doktoracie to publikacje w czasopismach, jedynie 6 z nich to recenzowane prace w materiałach konferencyjnych. Ważną pozycją w dorobku Habilitanta jest rozdział w książce *Nitride Semiconductors: Handbook on Materials and Devices (2003)*, w którym dr Kret jest pierwszym autorem. Imponująco wygląda też lista prezentacji konferencyjnych – wszystkich 123, w tym 109 po obronie rozprawy doktorskiej.
2. według bazy ISI Web of Science (stan na dzień 19 listopada 2012) publikacje dr Kreta cytowane są 589 razy (492 razy bez autocytowań). Daje to dobrą średnią 6,5 cytowań na pracę i pokazuje, że spotkały się one z dużym zainteresowaniem środowiska. Najlepiej cytowane prace to publikacje w *Physica Status Solidi B* (2001) oraz *Journal of Applied Physics* (2002) (praca H8) – obie po 64 cytowania. Według tej samej bazy wartość indeksu Hirscha wynosi 12.
3. dr Kret wygłosił osobiście 6 wykładów zaproszonych na ważnych konferencjach międzynarodowych (miedzy innymi MRS Fall Meeting, Boston 2000, Int. Conf. on Extended Defects in Semiconductors, Brighton 2000, Int. Conf. Nitride Semiconductors, Glasgow 2011), spośród 11, których był współautorem. Świadczy to

o uznaniu, jakim wyniki jego prac cieszą się w krajowym i międzynarodowym środowisku naukowym.

4. bogata współpraca z ważnymi ośrodkami naukowymi. Wymienić tu należy, poza ośrodkami w Polsce, Uniwersytety w Lozannie, Kadyksie, Caen, Warwick, Lille, Berlinie i Paryżu, firmę AIXTRON SE, centrum CEMES w Tuluzie, i inne. Współprace te znacznie poszerzyły możliwości badawcze Habilitanta. W niektórych z tych ośrodków (Paryż, Caen) dr Kret odbywał staże naukowe – w sumie ponad 6 lat.
5. duże zaangażowanie w działalność edukacyjną, opieka nad studentami i młodymi pracownikami naukowymi. Dorobek dr. S. Kreta w zakresie działań edukacyjnych w IF PAN obejmuje prowadzenie szeregu ćwiczeń z doktorantami w ramach warsztatów nt. metod analizy obrazów TEM oraz opiekę nad uczniami w ramach Turnieju Młodych Fizyków oraz warsztatów Krajowego Funduszu na Rzecz Dzieci. Prowadził on także (w latach 2006-2012) wykład nt. techniki TEM w ramach cyklu wykładów dla doktorantów „Fizyka, technologia i modelowanie wzrostu kryształów”. S. Kret de facto pełni funkcję kierownika naukowego doktoranta IFPAN Francesco Ivaldiego. Dodatkowo dr Kret współorganizował szereg warsztatów na temat techniki TEM, w szczególności w ramach Centrum Doskonałości Cepheus
6. dr Kret kierował 4 projektami oraz był wykonawcą w 12 innych projektach badawczych. W szczególności, w latach 2008 – 2012 kierował w IFPAN realizacją europejskiego projektu RAINBOW. Dodatkowo, uzyskał grant habilitacyjny MNiSW.

Przytoczone powyżej argumenty wyraźnie pokazują, że dr Kret jest dojrzałym, bardzo aktywnym pracownikiem ze znaczącym dorobkiem naukowym. Nie mam żadnych wątpliwości, że wyniki uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora stanowią, zgodnie z wymogami ustawy, „znaczący wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej”.

Reasumując, przedstawioną mi do recenzji rozprawę habilitacyjną dr Kreta oceniam bardzo pozytywnie. Jestem przekonany, że spełnia ona wszelkie wymogi formalne i zawiera prace z cennymi wynikami. Dlatego wnoszę o dopuszczenie dr Sławomira Kreta do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

