

Kraków, 31.08. 2022

Prof. dr hab. Józef Korecki
Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni
im. Jerzego Habera PAN

Recenzja

**w związku z postępowaniem w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego
dr. Mieczysławowi Pietrzykowi
w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne**

Przebieg pracy naukowej i zawodowej

Dr Mieczysław Pietrzyk ukończył studia magisterskie na Wydziale Matematyczno-Fizycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach w roku 2004. Praca magisterska dotyczyła elektrycznych i akustycznych właściwości dwuwarstwowych struktur sensorowych.

Studia doktoranckie odbył w latach 2005 - 2010 w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk. Promotorem pracy doktorskiej zatytułowanej „Wkład otwartych powłok 3d i 4f do struktury elektronowej wybranych półprzewodników IV-VI z Mn, Gd i Eu” był prof. dr hab. Bogdan Kowalski.

Po doktoracie został zatrudniony w IF PAN, najpierw na stanowisku fizyka, a następnie od roku 2018 na stanowisku adiunkta.

W trakcie wykonywania pracy doktorskiej realizował intensywne badania synchrotronowe, co wiązało się z licznymi krótkoterminowymi wizytami w ośrodkach synchrotronowych HASYLAB (Hamburg), DESY(Berlin) oraz MAXLAB (Lund).

Ocena osiągnięcia habilitacyjnego

Recenzowany wniosek habilitacyjny oceniony jest pod kątem spełnienia kryteriów określonych w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z uwzględnieniem art. 179 ust. 6 pkt 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Jako osiągnięcia naukowe będące podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego dr Mieczysław Pietrzyk przedstawił cykl dziesięciu wieloautorskich artykułów objętych wspólnym tytułem „Studnie kwantowe ZnO w nanosłupkach i strukturach

planarnych Zn(Mg,Cd)O otrzymywane na wybranych podłożach” wymienionych poniżej zgodnie z numeracją w autoreferacie:

- [H1] M.A. Pietrzyk, M. Stachowicz, A. Wierzbicka, P. Dłuzewski, D. Jarosz, E. Przeddziecka A. Kozanecki, *Growth conditions and structural properties of ZnMgO nanocolumns on Si(111)*, *J. Cryst. Growth* 408 (2014) 102-106 4
- [H2] M.A. Pietrzyk, M. Stachowicz, A. Reszka, A. Kozanecki, *Optical investigations of ZnO/ZnMgO quantum wells in self-assembled ZnMgO nanocolumns grown on Si (111) by MBE*, *J. Lumin.* 179 (2016) 610-615
- [H3] M.A. Pietrzyk, M. Stachowicz, D. Jarosz, R. Minikayev, M. Zielinski, P. Dłuzewski, A. Kozanecki, *Properties of ZnO/ZnMgO nanostructures grown on r-plane Al₂O₃ substrates by molecular beam epitaxy*, *J. Alloys Compd.* 650 256-261 (2015)
- [H4] M.A. Pietrzyk, M. Stachowicz, A. Wierzbicka, A. Reszka, E. Przeddziecka, A. Kozanecki, *Properties of ZnO single quantum wells in ZnMgO nanocolumns grown on Si (111)*, *Opt. Mater.* 42 406-410 (2015)
- [H5] M. A. Pietrzyk, M. Stachowicz, P. Dłuzewski, A. Wierzbicka, A. Kozanecki, *Self-organized ZnMgO nanocolumns with ZnO/ZnMgO quantum wells on c-plane Al₂O₃ substrates by MBE: growth conditions and properties*, *J. Alloys Compd.* 737, 748-751 (2018)
- [H6] M.A. Pietrzyk, A. Wierzbicka, M. Stachowicz, D. Jarosz, A. Kozanecki, *Fabrication and characterization of ZnMgO nanowalls on 4H-SiC by MBE method*, *J. Appl. Crystallogr.* 52, 168-170 (2019)
- [H7] M.A. Pietrzyk, A. Wierzbicka, E. Zielony, A. Pieniazek, R. Szymon, E. Placzek-Popko, *Fundamental studies of ZnO nanowires with ZnCdO/ZnO multiple quantum wells grown for tunable light emitters*, *Sensor. Actuator. A- Phys.* 315, 112305 (2020)
- [H8] M.A. Pietrzyk, E. Placzek-Popko, K.M. Paradowska, E. Zielony, M. Stachowicz, A. Reszka, A. Kozanecki, *Optoelectronic properties of ZnO/ZnMgO multiple quantum wells in ZnMgO nanocolumns grown on Si (111)*, *J. Alloys Compd.* 717, 41-47 (2017)
- [H9] M. Stachowicz, M.A. Pietrzyk, J.M. Sajkowski, E. Przeddziecka, H. Teisseyre, B. Witkowski, E. Alves, A. Kozanecki, *Asymmetric ZnO/ZnMgO double quantum well structures grown on m-plane ZnO substrates by MBE*, *J. Lumin.* 186, 262-267 (2017)
- [H10] J. Andrzejewski, M. A. Pietrzyk, D. Jarosz, A. Kozanecki, *Optical measurements and theoretical modelling of excitons in double ZnO/ZnMgO quantum wells in an internal electric field*, *Materials*, 14, 7222 (2021)

Wszystkie czasopisma, w których zostały opublikowane wyżej wymienione artykuły spełniają wymogi ustawowe, co pozwala formalnie zaliczyć cykl jako osiągnięcie habilitacyjne. Wśród tytułów czasopism dominują pozycje zaliczane w bazie Web of Science głównie w kategoriach związanych z nauką o materiałach. Trzy prace opublikowane zostały w *J. Alloys and Compounds* (100 pkt. ministerialnych), dwie w *J. Luminescence* (100 pkt.) oraz po jednej w *Materials* (140 pkt.) *J. Appl. Crystallography* (100 pkt.), *Sensors and Actuators, A-Physical* (100 pkt), *Optical Materials* (70 pkt.) i *J. Crystal Growth* (70 pkt). Poza nieco kontrowersyjnym *Materials*, brak jest na tej liście czasopism o najwyższej punktacji.

Artykuły te, pochodzące z lat 2014 – 2021, były cytowane około 70 razy, a z wyłączeniem samocytowań około 50 razy.

Dr Pietrzyk jest pierwszym (i jednocześnie korespondencyjnym) autorem w ośmiu z tych dziesięciu publikacjach. Oświadczenia współautorów i Habilitanta pozwalają wnioskować, że jego wkład koncepcyjny, eksperymentalny i merytoryczny na wszystkich etapach powstawania prac jest wiodący i dominujący (a w przypadku dwóch ostatnich prac, istotny).

Prace wchodzące w skład osiągnięcia dotyczą właściwości optycznych i strukturalnych nanokolumn i warstw na bazie ZnO z magnezem i kadmem.

Dwa zasadnicze wątki tych prac to (i) optymalizacja wzrostu warstw i nanokolumn i heterostruktur ZnO/ZnMgO ze studniami kwantowymi na różnych podłożach pod kątem ich właściwości strukturalnych oraz (ii) właściwości optyczne studni kwantowych osadzonych w tych nanostrukturach.

Badania morfologii i struktury wykonywane były przy pomocy skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM), dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (XRD) oraz mikroskopii sił atomowych (AFM). W artykule [H1] dyskutowane są warunki wzrostu i właściwości strukturalne nanokolumn ZnMgO osadzanych techniką MBE w wysokich temperaturach na podłożach Si(111) bez lub z buforem ZnO. Pokazano, że można otrzymać nanokolumny dobrej jakości o średnicach rzędu 50 nm bez używania katalizatora. Obrazy SEM pokazały, że średnica i powierzchniowa gęstość nanokolumn może być kontrolowana temperaturą procesu. Zaobserwowano też, że na podłożu krzemowym tworzy się cienka (3-4 nm) warstwa SiO₂. Podniesienie temperatury wzrostu struktur ZnO/ZnMgO pozwoliło uzyskać nanodruły o mniejszych średnicach (ok. 30 nm, praca [H2]).

Obok podłoży Si(111) stosowane były podłoża szafirowe o dwóch orientacjach: Al₂O₃(-1012) (r-plane) oraz Al₂O₃(0001) (c-plane). Dla podłoży Al₂O₃(-1012) [praca H3] możliwe było uzyskanie wzrostu planarnego ZnMgO (na buforze ZnO) lub nanokolumnowego, nachylonego pod kątem 62° do podłoża bez bufora. Pomiary rentgenowskie pozwoliły określić kierunek wzrostu, różny dla struktury planarnej i nanokolumnowej, co ma istotne znaczenie dla właściwości optycznych.

Na podłożach szafirowych c-Al₂O₃, nanokolumnowa struktura ZnMgO o orientacji c otrzymywana była na buforowej wielowarstwie ZnO/MgO (praca [H5]).

Trzeci typ stosowanych podłoży to węgiel krzemu 4H-SiC (praca [H6]). Otrzymywane w tym przypadku nanokryształy ZnMgO miały charakter „nanościan” wykazujących silną tendencję do samoorganizacji w równoległe periodyczne struktury

równoległych rzędów. Według autorów struktury ścian ZnMgO odpowiadają „nanopaskom” podłoża SiC (wydaje się, że chodzi tu raczej o strukturę stopni i tarasów wynikających z niedoskonałej orientacji podłoża), ale brak jednostek na skali obrazu AFM nie pomaga w porównaniu go z obrazem SEM.

Poza układami na bazie ZnMgO, jedna praca [H7] dotyczy układu struktur kwantowych ZnO/ZnCdO na Si(111).

Opisane powyżej badania o charakterze technologicznym i strukturalnym miały na celu optymalizację otrzymanych pojedynczych i wielokrotnych struktur kwantowych pod kątem ich właściwości optycznych. Badania optyczne prowadzono głównie stosując spektroskopię fotoluminescencyjną i katodoluminescencję. Badania optyczne mają w przeważającej mierze charakter rutynowy i zmierzają do potwierdzenia jakości struktur.

Dla struktur na Si(111), jako punkt wyjścia pokazano właściwości optyczne nanosłupków na Si(111) bez studni kwantowych, identyfikując linie pochodzące od struktury ZnMgO przy około 3.52 eV i emisji ekscytonów przy 3.385 eV. Zbadano również zależność właściwości optycznych od temperatury. Scharakteryzowano też pojedyncze studnie kwantowych ZnO w nanosłupkach ZnMgO/ZnO/ZnMgO w funkcji szerokości studni. Badania optyczne potwierdziły istnienie studni kwantowych o różnej szerokości oraz pokazały niebieskie przesunięcie emisji ekscytonowej w stosunku do litego ZnO.

Wykorzystując wzrost na różnych podłożach porównano właściwości optyczne dla polarnych i niepolarnych struktur, pokazując istotne różnice w widmach luminescencyjnych.

W podwójnych asymetrycznych studniach kwantowych ZnO poszukiwano efektu sprzężenia kwantowego poprzez barierę ZnMgO, zarówno dla układów na krzemie jak i na szafirze. W obu przypadkach dla odpowiednio cienkich barier zaobserwowano efekt sprzężenia, a dla układu na szafirze określono maksymalną grubość bariery, dla której sprzężenie zachodzi.

Najbardziej skomplikowane układy obejmują struktury z wieloma powtórzeniami studni ZnMgO/ZnO [H3] i ZnCdO/ZnO [H7]. Badania optyczne tych układów nie przynoszą jakościowo innych wyników w stosunku do struktur z pojedynczymi lub podwójnymi studniami kwantowymi.

Podsumowując, przedstawione osiągnięcie habilitacyjne zawiera istotne wyniki dotyczące technologii i właściwości strukturalnych układów planarnych i nanosłupków, jednorodnych oraz zawierających studnie kwantowe na bazie ZnMgO/ZnO i ZnCdO/ZnO. Te aspekty osiągnięcia habilitacyjnego są jego najmocniejszą stroną. Badania optyczne, którym poświęcono wiele uwagi i wysiłku nie wzbogacają w sposób bardzo istotny naszej

wiedzy, ale służą raczej potwierdzeniu jakości struktur kwantowych. Obok standardowych wyników dotyczących właściwości optycznych na uwagę zasługuje zbadanie kwantowego rozmiarowego efektu Starka dla studni ZnO/ZnMgO rosnących w kierunku polarnym. Chociaż poziom publikacji składających się na osiągnięcie jest nierówny, a czasami razi płytkość i ogólnikowość konkluzji, to w mojej ocenie osiągnięcie habilitacyjne spełnia na poziomie dostatecznym warunki ustawowe.

Ocena pozostałego dorobku i aktywności naukowej

Jak to wynika z Autoreferatu, poza osiągnięciem habilitacyjnym dr Mieczysław Pietrzyk jest współautorem 22 prac opublikowanych przed doktoratem i 14 prac opublikowanych po doktoracie. Tematyka prac przed doktoratem jest znacząco różna od tematyki osiągnięcia habilitacyjnego. Początki kariery naukowej, związane z realizacją pracy doktorskiej obejmują badania struktury elektronowej związków na bazie GeTe oraz PbTe z manganem i wybranymi ziemiami rzadkimi (Eu, Gd) metodą rezonansowej spektroskopii fotoemisyjnej. Technika ta wymaga stosowania synchrotronowego źródła promieniowania X i dlatego badania te były realizowane w ośrodkach synchrotronowych w Hamburgu oraz w Lund. Po doktoracie Habilitant podejmuje tematykę zespołu, w którym został zatrudniony, a więc zagadnienia związane z nanostrukturami tlenkowymi otrzymywanymi metodą epitaksji z wiązek molekularnych. Większość prac z tego okresu dotyczy, podobnie jak habilitacja, układów na bazie ZnO.

Według bazy Web of Science liczba cytowań wszystkich publikacji wynosiła na dzień składania wniosku 249 (181 bez samocytowań), a index Hirscha 10. Sumaryczny IF wszystkich publikacji, podany we wniosku według bazy JCR, wynosi w zaokrągleniu 103. W dorobku habilitanta jest niewiele prac w najwyższej punktowanych czasopismach na liście ministerialnej (140- i 200-punktowych).

Istotna aktywność naukowa dr. Mieczysława Pietrzyka obejmuje ponadto kierowanie projektem NCN Sonata „Studnie kwantowe ZnO w nanosłupkach ZnMgO hodowanych metodą MBE na wybranych podłożach”, wynikiem realizacji którego było 11 publikacji. Jest współtwórcą dwóch udzielonych patentów krajowych. Miał osiem wystąpień ustnych na dużych międzynarodowych konferencjach, był współautorem 16 wystąpień ustnych oraz autorem i współautorem około 80 prezentacji plakatowych na konferencjach międzynarodowych. Recenzował kilkanaście artykułów w specjalistycznych czasopismach międzynarodowych.

Dr Mieczysław Pietrzyk odbył kilkanaście wizyt badawczych do ośrodków synchrotronowych HASYLAB i MAXLAB, gdzie prowadził badania naukowe we współpracy międzynarodowej.

Był członkiem Komitetu Organizacyjnego dużej międzynarodowej konferencji „10th International Workshop on Zinc Oxide and Other Oxide Semiconductors” w roku 2018.

Podsumowując stwierdzam, że osiągnięcie naukowe dr. Mieczysława Pietrzyka Sobańskiej stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie nauki fizyczne, dotyczącej tlenkowych warstw i nanostruktur półprzewodnikowych, a w szczególności ich otrzymywania i właściwości strukturalnych i spełnia wymagania art. 219 ust. 1 pkt 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z uwzględnieniem art. 179 ust. 6 pkt 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Ponadto dr Mieczysław Pietrzyk wykazał się istotną aktywnością naukową, realizowaną w zagranicznych instytucjach naukowych.

