

Recenzja wniosku pani dr Euniki Zielony dotyczącego nadania stopnia doktora habilitowanego.

Praca habilitacyjna: „Badania wpływu defektów i odkształceń sieci na własności heterostruktur planarnych i kolumnowych na bazie półprzewodników szerokoprzerwowych ZnO i GaN”.

Po przeanalizowaniu dokonań pani dr Euniki Zielony, z przyjemnością stwierdzam, że w pełni kwalifikuje się Ona do uzyskania stopnia doktora habilitowanego.

Krytyczna opinia o sposobie prowadzenia badań materiałowo-technologicznych, przedstawiona w końcowej części mojej recenzji, ma wyłącznie na celu zwrócenie uwagi przyszłej Samodzielnej Pracownicy Nauki na mankamenty wynikające z wadliwej organizacji badań materiałowo-technologicznych w Polsce.

1. Ocena osiągnięć publikacyjnych

Habilitantka jest współautorką 50 prac podoktoratowych. W 10 z nich jest pierwszym autorem.

10 prac zostało wybranych do postępowania habilitacyjnego, z czego w 4 Habilitantka jest pierwszym autorem.

Sumaryczny IF wszystkich artykułów naukowych opublikowanych po doktoracie wg listy Journal Citation Reports (JCR): 209,058. Sumaryczny IF czasopism, w których opublikowano prace wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego wg listy JCR: 63,9.

Całkowita liczba cytowań wszystkich artykułów naukowych opublikowanych po doktoracie wg bazy Web of Science: 725, w tym bez autocytowań: 656.

Indeks Hirscha wg bazy Web of Science: 15, wg bazy Scopus: 15, wg Google Scholar: 17.

Podsumowując, dane bibliometryczne są w pełni zadowalające, a nawet znacząco wyższe od większości nadawanych habilitacji w Polsce.

2. Ocena merytoryczna przeprowadzonych badań opisanych w 10 wybranych pracach.

Wybór tematyki prowadzonych przez Habilitantkę badań oceniam niejednoznacznie. Z jednej strony, azotki galu, aluminium i indu są w chwili obecnej drugą co do ważności komercyjnej grupą półprzewodników (po Si-Ge). Główne aplikacje azotków to oświetlenie LEDowe, elektronika wysokich mocy i częstotliwości, a także technologie kwantowe (np., azotkowe diody laserowe służą do chłodzenia dopplerowskiego atomów). Z drugiej strony, tlenki cynku, magnezu i kadmu są ciekawą grupą półprzewodników, ale ze stosunkowo małym potencjałem aplikacyjnym jeżeli chodzi o emitery światła. Po kilkudziesięciu latach badań obu rodzajów materiałów, efektywność świecenia (wall plug efficiency- wpe) w przypadku azotków sięga 85%, podczas gdy dla tlenków jest znacznie poniżej 1%, co związane jest z brakiem odpowiedniego domieszkowania na typ p oraz z olbrzymią koncentracją defektów. Szkoda, że informacja o wydajnościach świecenia nie pojawia się w habilitacji, a wręcz przeciwnie- w każdej publikacji i opisie habilitacji jest zdanie, że LEDy i lasery na bazie ZnO mogą być konkurencyjne w stosunku do przyrządów azotkowych. Nie mogą.

Poniżej ocenione zostały prace Habilitantki wchodzące w skład wniosku habilitacyjnego:

[H1] M.A. Pietrzyk, E. Zielony, M. Stachowicz, A. Reszka, E. Placzek-Popko, A. Wierzbicka, E. Przeddziecka, A. Droba, A. Kozanecki, „**Electro-optical characterization of ZnO/ZnMgO structure grown on p-type Si (111) by PA-MBE method**”, Journal of Alloys and Compounds 587 (2014) 724-728.

We wstępie do tej pracy z roku 2014, Autorzy piszą: „ZnO is quite often considered as an alternative to GaN for device applications due to many reasons, such as lower production cost and excellent optical properties.” Po kilkunastu latach od publikacji tej pracy widać, że ZnO nie znalazło uznania w przemyśle, a pewną małą „cegiełkę” zniechęcania do tego materiału dołożył opisywany artykuł. Autorzy opisali szereg defektów (głównym defektem są wakanse tlenowe), wpływających na własności elektryczne i optyczne, a w szczególności na ich metastabilność, co eliminuje materiał z większości zastosowań komercyjnych. W artykule czytelnik znajdzie szereg ważnych informacji na temat własności struktur ZnMgO hodowanych metodą MBE na podłożach p-Si. Mankamentem pracy jest jednak brak dyskusji na temat wpływu silnego niedopasowania sieciowego ZnO i Si relaksowanego przez dużą gęstość dyslokacji, które także mogą wpływać na własności elektryczne i optyczne, a także na dyfuzję zabójczą dla przyrządów.

[H2] E. Zielony, E. Przeddziecka, E. Placzek-Popko, W. Lisowski, M. Stachowicz, K.M. Paradowska, R. Jakiela, A. Kozanecki, „**Deep levels in the MBE ZnO:As/n-GaN diodes - photoluminescence, electrical properties and deep level transient spectroscopy**”, Journal of Alloys and Compounds 742 (2018) 296-303.

Artykuł dotyczy niezwykle trudnego materiału ZnO:As/n-GaN/szafir. Trudnego ze względu na niedopasowania sieciowe, dużego prawdopodobieństwa tworzenia Ga_2O_3 na międzypowierzchni GaN/ZnO oraz obecności wielu defektów punktowych, o których można wnioskować jedynie pośrednio. Przy bardzo dużej gęstości dyslokacji następuje interdyfuzja utrudniająca interpretację wyników eksperymentalnych. Domieszkowanie arsenem jest na bardzo wysokim poziomie: ok. $8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Tak duże domieszkowanie musi prowadzić do wytrażeń arsenowych i całej „zoologii” kompleksów defektów punktowych. Koncentracja nośników elektrycznych jest o kilka rzędów niższa, co świadczy o niezwykle dużej kompensacji. Praca zawiera wyniki eksperymentalne z wielu technik: SIMS, XPS, DLTS, I-V, C-V, PL. Duża ilość wyników jest zaletą pracy, jednak brakuje przekonujących informacji o koncentracjach defektów. Przykładowo, koncentracje defektów badanych metodą DLTS są najprawdopodobniej o kilka rzędów niższe niż defektów mających wpływ na własności elektryczne. Ta kwestia nie jest w pracy dyskutowana.

[H3] 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**”, Sensors and Actuators A: Physical 315 (2020) 112305.

[H4] E. Zielony, A. Wierzbicka, R. Szymon, M.A. Pietrzyk, E. Placzek-Popko, „**Investigation of**

micro-strain in ZnO/(Cd,Zn)O multiple quantum well nanowires grown on Si by MBE", Applied Surface Science 538 (2021) 148061.

Obie prace (razem z H7) można uznać za najważniejsze w obszarze badań tlenków w całej habilitacji. Nanodrutu ZnCdO/ZnO są reklamowane jako „a promising material for potential visible-light optoelectronic applications, such as green light-emitting diodes, laser diodes, and photodetectors”. Jak wspomniano wcześniej, materiał ten nie ma szans konkurować z półprzewodnikami azotkowymi w produkcji emiterów światła, natomiast fotodetektory i sensory na bazie nanodrutów ZnO są coraz bliższe komercjalizacji mimo dużej konkurencji ze strony innych materiałów. Za szczególnie cenne można uznać wyniki uzyskane przez Habilitantkę dotyczące naprężeń w badanych nanodrutach. Wyniki te mogą być wykorzystane nie tylko w przypadku ZnCdO/ZnO, ale mogą być przydatne do modelowania naprężeń w nanodrutach innych materiałów.

[H5] R. Szymon, E. Zielony, A. Lysak, M.A. Pietrzyk, „**Influence of the type of interlayer on current transport mechanisms and defects in n-ZnO/ZnCdO/p-Si and n-ZnCdO/ZnO/p-Si heterojunctions grown by molecular beam epitaxy**”, Journal of Alloys and Compounds 951 (2023), 169859.

W pracy znalazła się bardzo duża ilość materiału doświadczalnego, jednak bardzo trudno wywnioskować z niej, dlaczego diody nominalnie p-n przewodzą prąd w obie strony niemal identycznie. Praca ta jest najmniej zrozumiała ze wszystkich prezentowanych.

[H6] E. Zielony, M.A. Pietrzyk, „**Diode characteristics of ZnO/ZnMgO nanowire p-n junctions grown on Si by molecular beam epitaxy**”, Materials Science and Engineering B: Advanced Functional Solid-State Materials 268 (2021) 115148.

Bardzo ciekawa praca dotycząca nanodrutów ZnO/ZnMgO, jednak posiada ona wiele mankamentów, na przykład brakuje wyjaśnienia, dlaczego użyto takiego, a nie innego układu warstw. Habilitantka reklamuje badany materiał jako przyszłe LEDy, ale nie wyjaśnia jak dziury i elektrony mają się spotkać w studni kwantowej ZnO (typem p jest podłoże Si, więc złącze p-n jest znacznie oddalone od tych studni). Podobnie, jak w pracy poprzedniej, charakterystyka prąd-napięcie wskazuje na zbyt duży prąd wsteczny. Dodatkowo, DLTS podaje informację o koncentracjach defektów na poziomie 10^{14} cm^{-3} , podczas gdy koncentracje innych defektów są o kilka rzędów większe.

[H7] E. Zielony, G. Szalewska, M.A. Pietrzyk, „**Probing n-ZnMgO/p-Si nanowire junctions: Insights into composition, strain, and defects via Raman spectroscopy and electrical measurements**”, Journal of Alloys and Compounds 1010 (2025) 177851.

Praca ta jest niezwykle ciekawa z punktu widzenia metodyki pomiarowej, pokazującej jak dużo informacji można wyekstrahować z trudnych pomiarów wykonanych na materiale niezwykle skomplikowanym. Jest to niewątpliwie duże osiągnięcie Habilitantki.

[H8] E. Zielony, R. Szymon, A. Wierzbicka, A. Reszka, M. Sobanska, W. Pervez, Z.R. Zytkeiwicz, **„Strain and lattice vibration mechanisms in GaN-Al_xGa_{1-x}N nanowire structures on Si substrate”**, Applied Surface Science 588 (2022) 152901.

Praca ta dotyczy charakteryzacji nanodrutów AlGa_N/Ga_N hodowanych metodą MBE. Najbardziej prawdopodobnym zastosowaniem tego rodzaju materiału są emitery światła ultrafioletowego, także w niezwykle atrakcyjnym (dezynfekcja i sterylizacja) obszarze UVC. Dlatego podstawową charakterystyką powinna być luminescencja, a tej zabrakło w pracy. Zawartość aluminium w warstwach AlGa_N podawana jest na podstawie planowanej wartości, a nie zmierzonej. Utrudnia to zrozumienie mechanizmów wzrostu i relaksacji AlGa_N. Mimo to wyniki Habilitantki dotyczące naprężeń są niezwykle ciekawe i przydatne dla wszystkich, którzy by planowali opracowanie technologii emiterów UV na bazie nanodrutów AlGa_N/Ga_N.

[H9] R. Szymon, E. Zielony, M. Sobanska, T. Stachurski, A. Reszka, A. Wierzbicka, S. Gieraltowska, Z.R. Zytkeiwicz, **„Enhancing GaN nanowires performance through partial coverage with oxide shells”**, Small, 2024, 2401139.

[H10] R. Szymon, M. Sobanska, Z.R. Zytkeiwicz, S. Gieraltowska, E. Zielony, **„Spectral reflectance of core-shell GaN-(Al/Hf)O_x nanowires within adapted effective medium approximation”**, Optics Letters 49 (2024) 7082-7085.

Prace dotyczą badań nad nanodrutami Ga_N pokrytymi tlenkiem aluminium lub hafniu. Materiały takie mogą być przydatne ze względu na ochronę nanodrutów przed szkodliwym wpływem atmosfery (np., zawierającą parę wodną). W tym przypadku wykonane zostały badania luminescencyjne, jednak nie zostały porównane ze zwykłym wysokiej jakości Ga_Nem hodowanym metodą MBE lub MOVPE. Fakt, iż luminescencja została zmierzona jedynie w ultraniskiej temperaturze wskazuje, że intensywność luminescencji była najprawdopodobniej bardzo niska. Pytanie się pojawia, czy przed wykonywaniem opisanych w pracy badań nie należało doprowadzić do znaczącej luminescencji nanodrutów (czyli eliminacji defektów obniżających luminescencję)? Czy dla takiego zoptymalizowanego materiału wyniki pomiarów Habilitantki byłyby takie same? Recenzent ma poważne wątpliwości.

3. Ocena zaangażowania Habilitantki w organizację badań naukowych.

Osiągnięcia Habilitantki w proces edukacyjny jest imponujący: opieka nad 8 magistrantami i 13 inżynierami, promotorstwo pomocnicze doktoratu, wykłady i zajęcia ze studentami, działania popularyzatorskie.

Habilitantka współpracuje aktywnie z Instytutem Fizyki PAN, Instytutem Fotoniki i Mikroelektroniki Sieci Łukasiewicz, Instytutem Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN, Instytutem Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, a także z kilkoma laboratoriami zagranicznymi, aczkolwiek ta współpraca nie jest bardzo aktywna (bardzo mało wspólnych publikacji).

Habilitantka była kierownikiem dwóch projektów (w tym OPUSa) oraz była wykonawcą w 4 innych projektach.

Reasumując, aktywność Habilitantki w działaniach organizacyjnych należy ocenić bardzo wysoko, wrażając pewność, że tytuł „Samodzielnego Pracownika Nauki” trafi do właściwej Osoby.

4. Krytyczne uwagi na temat organizacji badań technologiczno-materiałowych, w których brała udział Habilitantka.

Jak wspomniano na wstępie, krytyczne uwagi zamieszczone poniżej nie odnoszą się bezpośrednio do samej habilitacji, a jedynie mają za zadanie zwrócenia uwagi przyszłej Samodzielnej Pracownicy Naukowej na sens wykonywania badań w sposób opisany w habilitacji.

Sposób ten wyglądał następująco:

- w Instytucie Fizyki PAN były hodowane najrozmaitsze próbki. Ich wzrost metodą MBE ma kilkanaście parametrów technologicznych: temperaturę, stosunek III/N lub II/O, przepływy reagentów, dezorientację podłoża, przerwy między wzrostem kolejnych warstw, itp. W publikowanych pracach, które składają się na habilitację, parametry te niemal nie są dyskutowane. Stąd pojawia się pytanie, czy własności próbek są cechą jakiejś szerszej klasy materiałów hodowanych w różnych warunkach, czy są tylko cechą tych konkretnych badanych próbek, a odtworzenie technologii w innym laboratorium w zasadzie jest niemożliwe, co czyni opublikowane prace mało użytecznymi?

- Habilitantka następnie badała własności próbek i z tego zadania wywiązała się znakomicie. Badania wykonane przez Habilitantkę dostarczyły bardzo dużo informacji na temat defektów, naprężeń i własności elektrycznych badanych materiałów. Sens takich badań byłby jednak dużo większy, gdyby wyniki Habilitantki posłużyły optymalizacji technologii wytwarzania materiałów w IF PAN. Z opisu habilitacji nic takiego nie wynika: żadne sprzężenie zwrotne wzrost materiału- charakteryzacja- wzrost materiału nie zostało pokazane, a można spekulować, że żadnego takiego sprzężenia nie było.

Tego rodzaju badania wykonywane są w setkach laboratoriów w Polsce (także czasem, ale nie zawsze, w laboratorium recenzenta!), a jedynym ich celem jest opublikowanie pracy (publish or perish), a nie stworzenie komercyjnie atrakcyjnej technologii opartej o wybór optymalnego materiału i optymalnych parametrów jego wzrostu. Publikacje takie, w których wszystkie parametry wzrostu nie są wzięte pod uwagę, niestety, przyczyniają się do szumu informacyjnego, zamiast wzbogacać ogólnoswiatową wiedzę.

Habilitantka, jak wspomniano, ma niezłe osiągnięcia bibliograficzne, jednak Jej umiejscowienie na światowej mapie naukowej stwarza poczucie niedosytu- Habilitantka nie publikuje w czasopiśmie o bardzo wysokich wskaźnikach oddziaływania, ani nie wygłasza referatów zaproszonych na ważnych konferencjach międzynarodowych. Związane jest to z

czynnikami wspomnianymi wcześniej- badaniem mało obiecujących materiałów na bazie ZnO oraz badaniem materiałów wytwarzanych bez odpowiedniej optymalizacji.

Warto, żeby Habilitantka dołączyła do grona, które chce nadać prawdziwy sens komercyjny badaniom technologicznym, czego Jej, sobie i Polsce życzę.

5. Podsumowanie

Habilitantka spełnia wszystkie wymogi (ustawa z dn 20 lipca 2018 r Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce) konieczne do uzyskania stopnia doktora habilitowanego. Dane bibliograficzne, umiejętność wykonywania bardzo trudnych pomiarów, zaangażowanie we współpracę naukową, są na wyższym poziomie od większości habilitacji w Polsce. Szczególnie cenne są wyniki badań Habilitantki dotyczące nanodrutów, które mają szansę na komercyjne zastosowania jako sensory różnych substancji. Słowa krytyki zostały napisane wyłącznie w celu stymulacji przyszłej Pani Doktor Habilitowanej do prowadzenia badań na światowym poziomie.

Zgodnie z ustawą Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. 2024 poz. 1571) wnioskuję z pełnym przekonaniem do Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne Politechniki Wrocławskiej o nadanie doktor Eunice Zielony stopnia doktora habilitowanego.