

Bartłomiej Sławomir Witkowski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Warszawa, 2019

Autoreferat

Spis treści

1. Imiona i nazwisko	2
2. Wykształcenie i stopnie naukowe	2
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowo-badawczych	2
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.) będącego podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego	3
4.1 Tytuł cyklu publikacji oraz wykaz publikacji wchodzących w jego skład	3
4.2 Dane bibliometryczne	4
4.3 Wprowadzenie - tło naukowe badań	5
4.4 Fotorezystor oparty o nanosłupki ZnO na podłożu krzemowym (H1)	7
4.5 Analiza właściwości optycznych nanosłupków ZnO (H2, H3)	9
4.6 Wzrost i właściwości nano/mikrosłupków wzrastanych epitaksjalnie na podłożach z GaN (H4, H5)	13
4.7 Zastosowanie nanosłupków ZnO w ogniwach fotowoltaicznych (H6, H7, H8)	17
4.8 Przegląd potencjalnych zastosowań nanosłupków ZnO [H9]	22
4.9 Podsumowanie – najważniejsze osiągnięcia	23
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.	23
5.1 Opis dorobku naukowego nie związanego z tematem habilitacji	23
5.2 Prezentacje na konferencjach, seminariach	27
5.3 Działalność organizacyjna, edytorska i recenzencka	28
5.4 Działalność dydaktyczna i popularyzatorska	29
5.5 Udział w realizacji projektów naukowych	30
5.6 Otrzymane nagrody, stypendia i wyróżnienia	30
5.7 Budowa unikatowej aparatury badawczej	31
5.8 Patenty i zgłoszenia patentowe	31
5.9 Referencje	32

1. Imiona i nazwisko

Bartłomiej Sławomir Witkowski

2. Wykształcenie i stopnie naukowe

- 2009-2014 Studia doktoranckie w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Uzyskany stopień i rok uzyskania: **doktor nauk fizycznych, 2014**
Praca doktorska pt.: „*Hydrotermalna technologia otrzymywania nanosłupków ZnO*”
Promotor: prof. dr hab. Marek Godlewski
- 2007-2009 Studia II stopnia na kierunku fizyka, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy,
Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie
Uzyskany tytuł i rok uzyskania: **magister fizyki, 2009**
Praca magisterska pt.: „*Badania strukturalne metodą mikroskopii elektronowej warstw tlenku cynku domieszkowanych manganem i kobaltem*”
Promotor: prof. dr hab. Marek Godlewski
- 2004-2007 Studia I stopnia na kierunku Makrokierunek (matematyka, fizyka, chemia, ze
specjalizacją informatyka stosowana), Wydział Matematyczno-Przyrodniczy,
Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie
Uzyskany tytuł i rok uzyskania: **licencjat, 2007**
Praca licencjacka pt.: „*Rozciąganie białek - interaktywna baza danych BSDB*”
Promotor: dr Joanna Idea Sułkowska

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowo-badawczych

- 2015 - obecnie Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Stanowisko: Adiunkt
- 2016 - 2017 Centrum Badań i Rozwoju Technologii dla Przemysłu S.A.
Stanowisko: Pracownik Naukowy
(realizacja projektów badawczo-wdrożeniowych)
- 2009 - 2015 Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Stanowisko: Fizyk

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.) będącego podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

4.1 Tytuł cyklu publikacji oraz wykaz publikacji wchodzących w jego skład

Osiągnięciem naukowym będącym podstawą ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego jest cykl dziewięciu artykułów opublikowanych w czasopismach o międzynarodowym zasięgu zatytułowany:

„Rozwój technologii wzrostu, analiza właściwości optycznych nano/mikrośłupków ZnO oraz przykłady ich zastosowań w fotorezystorze i ogniwach fotowoltaicznych”

Osiem pierwszych prac cyklu to artykuły zawierające nowe wyniki i stanowiące główną wartość naukową cyklu habilitacyjnego. W czterech pierwszych pracach cyklu jestem pierwszym autorem, a w czterech kolejnych pracach pierwszymi autorami są doktoranci, których byłem lub wciąż jestem promotorem pomocniczym. Ostatnia praca cyklu jest artykułem jednoautorskim, która wprowadzie nie zawiera moich nowych wyników, jest natomiast pracą przeglądową na temat zastosowań nanosłupków ZnO, w której prace moje i moich współpracowników zostały przedstawione na tle innych grup badawczych.

Publikacje wchodzące w skład cyklu:

- H1. B.S. Witkowski, R. Pietruszka, S. Gieraltowska, L. Wachnicki, H. Przybylinska, M. Godlewski
Photoresistor based on ZnO nanorods grown on p-type silicon substrate,
Opto-Electronics Review 25 (1), 15-18 (2017)
- H2. B.S. Witkowski, L. Wachnicki, S. Gieraltowska, A. Reszka, B.J. Kowalski, M. Godlewski
Low-Temperature Cathodoluminescence Investigations of High-Quality Zinc Oxide
Nanorods,
Microscopy and Microanalysis 21 (3), 564-569 (2015)
- H3. B.S. Witkowski, V.Y. Ivanov, Ł. Wachnicki, S. Gieraltowska, M. Godlewski
Optical Characterization of ZnO Nanorods Grown by the Ultra-Fast and Low Temperature
Hydrothermal Process,
Acta Physica Polonica A 130 (5), 1199-1201 (2016)
- H4. B.S. Witkowski, P. Dłuzewski, J. Kaszewski, L. Wachnicki, S. Gieraltowska, B. Kurowska, M.
Godlewski
Ultra-fast epitaxial growth of ZnO nano/microrods on a GaN substrate, using the microwave-
assisted hydrothermal method
Materials Chemistry and Physics 205, 16-22 (2018)

- H5. A. Pieniżek, B.S. Witkowski, A. Reszka, M. Godlewski, B.J. Kowalski
Optical properties of ZnO microrods grown by a hydrothermal method – a cathodoluminescence study
Optical Materials Express 6 (12), 3741-3750 (2016)
- H6. R. Pietruszka, B.S. Witkowski, G. Luka, L. Wachnicki, S. Gieraltowska, K. Kopalko, E. Zielony, P. Bieganski, E. Placzek-Popko and M. Godlewski
Photovoltaic properties of ZnO nanorods/p-type Si heterojunction structures
Beilstein Journal Nanotechnology 5, 173–179 (2014)
- H7. R. Pietruszka, B.S. Witkowski, S. Gieraltowska, P. Caban, L. Wachnicki, E. Zielony, K. Gwozdz, P. Bieganski, E. Placzek-Popko, M. Godlewski
New efficient solar cell structures based on zinc oxide nanorods
Solar Energy Materials & Solar Cells 143, 99–104 (2015)
- H8. R. Pietruszka, B.S. Witkowski, E. Zielony, K. Gwozdz, E. Placzek-Popko, M. Godlewski
ZnO/Si heterojunction solar cell fabricated by atomic layer deposition and hydrothermal methods
Solar Energy 155, 1282-1288 (2017)
- H9. B.S. Witkowski
Applications of ZnO nanorods and nanowires - a review
Acta Physica Polonica A 134 (6), 1226-1246 (2018)

4.2 Dane bibliometryczne

Na mój dorobek naukowy składa się **118** publikacji indeksowanych w bazie Journal of Citation Reports (JCR), z czego w czasopismach posiadających „czynnik wpływu” („impact factor” - IF) ukazało się **100** publikacji. Sumaryczny IF publikacji naukowych według tej listy wynosi **202,236**, a całkowita liczba cytowań - **1012**, bez uwzględniania auto-cytowań - **792**. Mój indeks Hirscha wynosi **17**. Na dorobek naukowy składają się prace z różnych czasopism naukowych, m.in.: Nucleic Acids Research (IF 2017: 11,561), ACS Appl. Mater. Interfaces (IF 2017: 8,097), Nanoscale (IF 2017: 7,233), Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine (IF 2017: 6,5), Acta Materialia (IF 2017: 6,036), Electrochimica Acta (IF 2017: 5,116), Solar Energy Materials & Solar Cells (IF 2017: 5,018), Materials & Design (IF 2017: 4,525), Solar Energy (IF 2017: 4,374), Scientific Reports (IF 2017: 4,122), Physical Review B (IF 2017: 3,813), Journal of Alloys and Compounds (IF 2017: 3,779), Applied Physics Letters (IF 2017: 3,495), CrystEngComm (IF 2017: 3,304).

Pełna lista artykułów znajduje się w załączniku nr 4. Powyższe dane zostały zestawione na podstawie Web of Science (stan z dnia 9 stycznia 2019 roku).

4.3 Wprowadzenie - tło naukowe badań

Tlenek cynku (ZnO) jest półprzewodnikiem grupy II - VI o szerokiej przerwie energetycznej (zakres spektralny bliskiego ultrafioletu), strukturze krystalograficznej wurcytu (struktura kubiczna jest niestabilna) i naturalnym przewodnictwem typu n, czyli elektronowym [1]. Ze względu na swoje właściwości jest niezwykle szeroko i intensywnie badanym materiałem w ostatnich dwudziestu latach, szczególnie w kontekście potencjalnych zastosowań w elektronice, optoelektronice, urządzeniach piezoelektrycznych, czy w czujnikach i detektorach. Te zastosowania zostały omówione w pracy przeglądowej H9. Dla wielu z tych zastosowań przejście do skali nanometrowej może otworzyć zupełnie nowe możliwości aplikacyjne. Tlenek cynku może występować w ogromnej liczbie form nanostruktur, np. jako słupki [2], rurki [3], włókna [2], paski [2,4,5], pierścienie [2], spiralki [6], łuki [2], igły [2], które dodatkowo mogą być wytwarzane przez różne metody od wysokotemperaturowych procesów w próżni do procesów niskotemperaturowych w otoczeniu wodnym [7,8]. Mimo wielu niezwykle obiecujących wyników w różnych dziedzinach [H9] nanostruktury ZnO wciąż nie są stosowane przemysłowo. Być może problemem w tej kwestii są używane technologie i wyrafinowane procedury, które wprawdzie dostarczają bardzo obiecujące rezultaty w skali laboratoryjnej, to jednak nie nadają się do przemysłowego wdrożenia ze względu na koszty, trudności skalowania technologii lub złożoność procedur. Ta konkluzja oparta jest na przeglądzie prac zestawionych w artykule H9.

W swojej pracy skupiałem się na nanosłupkach ZnO wzrastających z roztworu wodnego metodą opracowaną i przedstawioną w mojej pracy doktorskiej obronionej w 2013 r. [9], w której zostały zaprezentowane możliwości metody, podstawowa charakterystyka otrzymanych nanosłupków, a także został zaprezentowany przykład ich zastosowania w postaci detektora ultrafioletu [10].

Często w fizyce pod pojęciem nanostruktur rozumie się obiekty o wymiarach, dla których pojawiają się zjawiska kwantowe, natomiast w chemii czy biologii jako nanostruktury rozumie się wszelkie obiekty, które mają jeden z wymiarów mniejszy od $1\mu\text{m}$. Ze względu na brak jednoznacznej definicji nanosłupków, czy ogólnie nanostruktur, chciałbym sprecyzować używane przeze mnie pojęcie. Pod nazwą nanosłupków, którego używam w niniejszym tekście, mam na myśli struktury, dla których przynajmniej dwa wymiary są mniejsze od $1\mu\text{m}$. W tekście pojawia się również pojęcie mikrosłupków, które dotyczy struktur ZnO wzrastających na podłożu GaN. W tym przypadku mam na myśli struktury, dla których wszystkie wymiary są rzędu pojedynczych mikrometrów.

Po uzyskaniu stopnia doktora skupiałem się na nowych aspektach badań związanych z nanosłupkami ZnO. Pierwszym celem był dalszy rozwój metody, w tym głębsze zrozumienie mechanizmu wzrostu, skalowanie metody do większych rozmiarów podłoży oraz prace nad wzrostem epitaksjalnym. Drugim celem było dokładne poznanie właściwości nanosłupków. W szczególności przedmiotem intensywnych badań były ich właściwości optyczne, których poznanie jest kluczowe dla zastosowań optoelektronicznych. Kolejnym celem była demonstracja możliwości zastosowania nanosłupków w ogniwach fotowoltaicznych, wykorzystując właściwości i wysoką jakość krystalograficzną nanosłupków ZnO. W realizacji powyższych celów pracowałem wspólnie z dwójką młodych współpracowników – Agnieszką Pieniążek (której jestem promotorem pomocniczym) oraz Rafałem Pietruszką (którego byłem promotorem pomocniczym, a który uzyskał już stopień doktora w 2016 roku [11]).

Metoda wzrostu nanosłupków ZnO z roztworu wodnego została opracowana na początku lat 90-tych. Najpierw prace przedstawił Andres Verges [12] (podłużne nanostruktury ZnO z roztworu, lecz nie związane z żadnym podłożem), a w kolejnych latach Lionel Vayssieres przedstawił w swoich pracach [7, 13] metodę wzrostu nanosłupków ZnO na podłożu i jest on uważany za pioniera w tej dziedzinie. Metoda ta opierała się na powolnym wytrącaniu ZnO z przesyconego roztworu wodorotlenku cynku. Metoda przedstawiona w mojej pracy doktorskiej stanowiła nowe podejście opierające się na dynamicznej reakcji chemicznej, przez co znacznie został skrócony czas wzrostu i obniżono temperaturę wzrostu. Osiągnięto dzięki temu dodatkowy atut – otrzymane nanosłupki są monokryształami pozbawionymi luk tlenowych i to stanowi podstawową wartość metody (obok niskich kosztów, prostoty, skalowalności i aspektów ekologicznych). Ten wynik stanowi ogromną szansę dla wielu aplikacji, dla których jakość krytalograficzna jest kluczową cechą, a które wcześniej nie mogły zostać zrealizowane ze względu na złożoność bądź koszty technologii.

Jednym z ciekawszych wyników uzyskanych w czasie doktoratu była obserwacja, iż próbki zawierające nanosłupki ZnO na podłożach krzemowych wysokooporowych (standardowo używane podłoże) drastycznie zmieniają oporność pod wpływem światła widzialnego. Wynik ten stał się podstawą projektu naukowego, którego byłem kierownikiem (projekt Preludium finansowany przez NCN), pod tytułem “Wyjaśnienie mechanizmów zmiany właściwości elektrycznych nanosłupków ZnO wytwarzanych metodą hydrotermalną pod wpływem światła z zakresu widzialnego i UV”. W czasie realizacji projektu szybko okazało się, że obserwowane wcześniej zachowanie jest związane ze złączem pomiędzy nanosłupkami a zastosowanym podłożem krzemowym, natomiast dla podłoża przezroczystego (np. kwarc, szkło) struktura reagowała jedynie na światło z zakresu UV (co stało się podstawą przedstawionego w pracy doktorskiej detektora UV). W przypadku podłoża krzemowego sytuacja była znacznie bardziej skomplikowana i prace te były kontynuowane już po uzyskaniu stopnia doktora. Ostatecznie mechanizm zmian oporności został wyjaśniony i opublikowany w pierwszej pracy wchodzącej w skład cyklu habilitacyjnego [H1], jednocześnie zamykając kierowany przeze mnie projekt naukowy.

W kolejnych latach (po otrzymaniu stopnia doktora) kontynuowałem prace nad rozwojem metody skupiając się głównie na aspekcie możliwości zastosowania innego rodzaju zarodkowania wzrostu oraz skalowalności (pierwsze procesy były wykonywane dla rozmiarów podłoża $1 \times 1 \text{ cm}^2$, a w obecnej chwili metoda pozwala na wzrost nanosłupków na podłożach o rozmiarach $15,6 \times 15,6 \text{ cm}^2$ – rozmiar podstawowej komórki fotowoltaicznej), a także dalszej charakteryzacji nanosłupków, w szczególności ich właściwości optycznych (prace H2 i H3).

Kolejnym kierunkiem jedynie wskazanym w pracy doktorskiej, a rozwijanym po uzyskaniu stopnia doktora jest wzrost epitaksjalnych i zorientowanych nanosłupków na podłożach dopasowanych krytalograficznie (np. GaN). W tym obszarze do cyklu habilitacyjnego weszły dwie prace, z których pierwsza (H4) przedstawia opis metody wzrostu, możliwości metody oraz głębsze poznanie mechanizmu wzrostu. Z kolei praca H5 przedstawia analizę właściwości optycznych takich słupków, w szczególności wykorzystania ich jako rezonatory optyczne.

Kolejne prace w cyklu (H6, H7, H8) dotyczą zastosowania nanosłupków ZnO w fotowoltaicznych ogniwach krzemowych i jest to część pracy o największym potencjale aplikacyjnym. Materiał badawczy opublikowany w tych pracach jest wynikiem pracy doktorskiej Rafała Pietruszki, którego byłem promotorem pomocniczym. Ze względu na ogromne nakłady finansowe poniesione na całym

świecie na przemysł ogniw krzemowych spodziewany jest dalszy rozwój tej dziedziny, który wymaga jednak redukcji kosztów produkcji ogniw poprzez modyfikację technologii istniejących linii produkcyjnych. Dlatego nasze prace skupiły się na modyfikacji architektury ogniw krzemowych, gdzie złącze Si(p)/Si(n) zostało zastąpione złączem Si(p)/ZnO(n). Takie rozwiązanie może zredukować koszty produkcji ogniw, a także wyeliminować energochłonne i toksyczne procesy związane z wytworzeniem warstwy Si(n) oraz nanostrukturyzacją powierzchni ogniw.

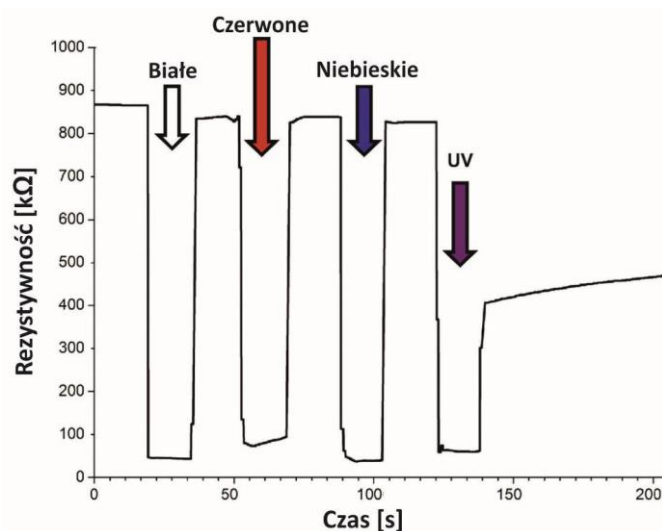
Ostatnia praca w cyklu habilitacyjnych (H9) jest przeglądem opisującym różnorodne potencjalne zastosowania nanosłupków ZnO w takich urządzeniach, jak emiterzy i detektory światła, emiterzy polowe, tranzystory, sensory substancji chemicznych, ogniwa fotowoltaiczne i nanogeneratory elektryczne, w których osiągnięcia moje i moich współpracowników zostały umieszczone na tle innych grup badawczych.

Wszystkie prace zawarte w cyklu habilitacyjnym (z wyjątkiem części pracy H2, co zostało sprecyzowane w dalszej części autoreferatu) stanowią nowy dorobek naukowy, który nie był włączony do pracy doktorskiej.

4.4 Fotorezystor oparty o nanosłupki ZnO na podłożu krzemowym (H1)

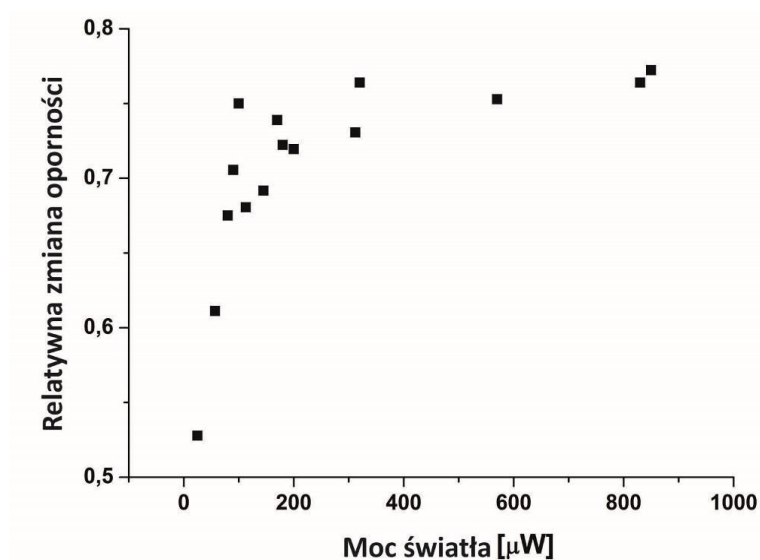
Pierwsza praca z cyklu została opublikowana w ramach projektu finansowanego ze środków NCN pt. „Wyjaśnienie mechanizmów zmiany właściwości elektrycznych nanosłupków ZnO wytwarzanych metodą hydrotermalną pod wpływem światła z zakresu widzialnego i UV”. Mechanizm reakcji na światło ultrafioletowe został zbadany i przedstawiony w mojej pracy doktorskiej, natomiast poznanie źródła reakcji na światło widzialne okazało się znacznie bardziej złożonym problemem, który był analizowany po uzyskaniu stopnia doktora, a wyniki tej analizy zostały umieszczone w pracy H1.

W szczególności w tej pracy opisana jest analiza zmiany oporności struktury nanosłupki ZnO/krzem. Struktura ta pod wpływem światła widzialnego niezwykle szybko obniża rezystywność, a po zakończeniu naświetlania mierzony opór wraca do wartości pierwotnej (rys.1).



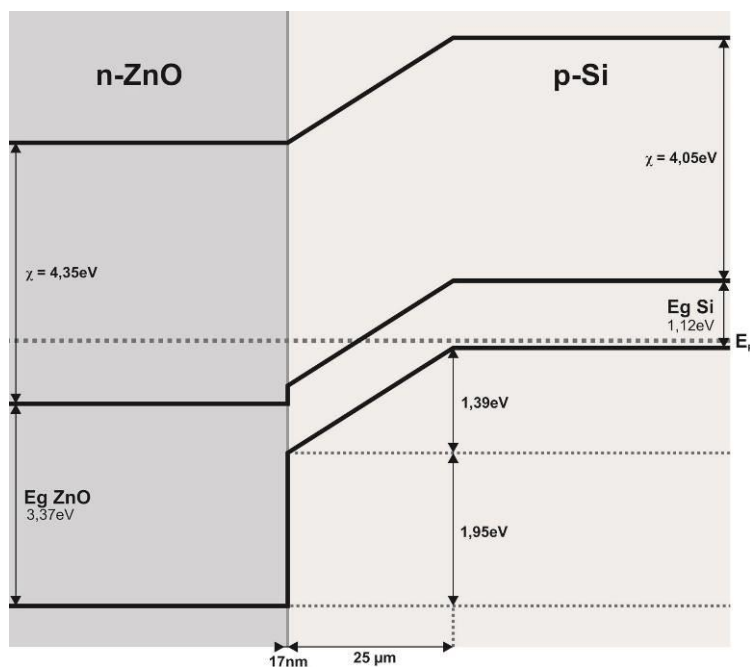
Rys. 1. Rezystywność struktury ZnO/Si pod wpływem światła dla różnych zakresów spektralnych. Rysunek pochodzi z pracy H1.

Reakcja ta została zbadana dla różnych środowisk (powietrze, tlen, azot, próżnia), które nie miały wpływu na mechanizm zmiany oporności, a także dla różnych intensywności i długości fali zastosowanego światła. W tym przypadku okazało się, że efekt ten jedynie w niewielkim stopniu zależy od intensywności czy długość fali światła (w zakresie widzialnym) i stosunkowo szybko się nasyca nawet dla małych mocy padającego światła (co umożliwia jego zastosowanie jako przełącznik optyczny) (rys. 2).



Rys. 2. Relatywne zmiany oporności struktury w funkcji mocy światła. Pomiar został wykonany dla różnych długości fali światła w zakresie spektralnym 400-1100nm.

Następnie zostały wykonane pomiary właściwości elektrycznych struktury, na podstawie których wg modelu Andersona [14] został wyznaczony diagram pasmowy (rys. 3).

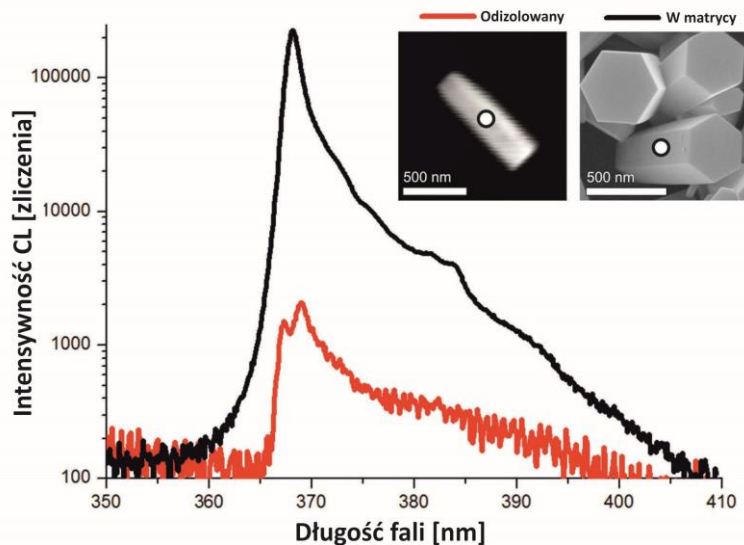


Rys. 3. Diagram pasmowy złącza ZnO/Si. Rysunek pochodzi z pracy H1.

Zgodnie z wyliczeniami praktycznie cała warstwa zubożona o szerokości 25 μm znajduje się po stronie krzemu (po stronie ZnO jedynie 17nm). Pozwoliło na zaproponowanie mechanizmu zmiany oporności. Światło widzialne zaabsorbowane w obszarze złącza (po stronie krzemu) powoduje generację par elektron–dziura, które są efektywnie rozdzielane w obszarze złącza. Elektrony, które na skutek zagięcia pasm wędrują do nanosłupków nie biorą aktywnego udziału w przewodnictwie. Dziury natomiast gromadzą się w warstwie przypowierzchniowej krzemu, tworząc efektywny kanał przewodnictwa (powodując obserwowaną makroskopowo zmianę oporności). Ponieważ szerokość obszaru złącza jest relatywnie duża, separacja nośników jest bardzo wydajna. Dla wyższych intensywności światła wzrasta liczba nośników, a tym samym kurczy się obszar zagięcia pasm i separacja jest mniej efektywna. Dlatego dla bardzo niskich intensywności światła ($\sim\mu\text{W}$) czułość detektora jest bardzo wysoka, natomiast dla wyższych intensywności światła obserwujemy masycenie zmian oporności i spadek czułości.

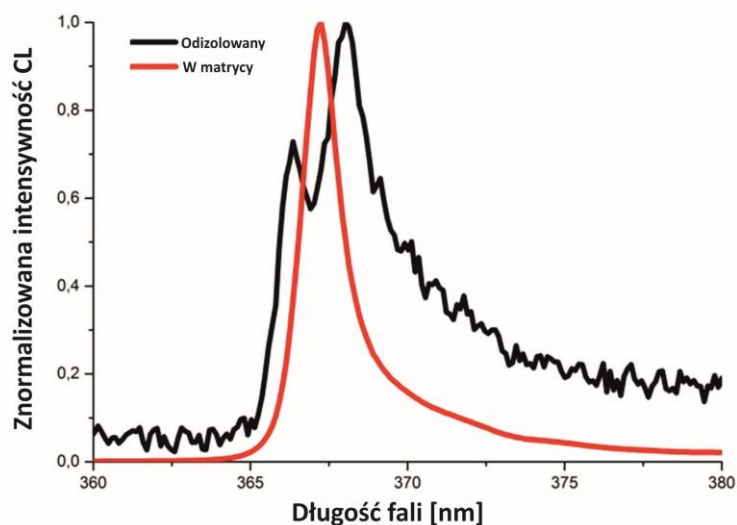
4.5 Analiza właściwości optycznych nanosłupków ZnO (H2, H3)

Wysoka jakość krystalograficzna nanosłupków umożliwia aplikacje nanosłupków w wielu różnych zastosowaniach, m.in. w urządzeniach optoelektronicznych, np. w „laserach nieuporządkowanych” (ang. random lasers). Pierwsze doniesienia literaturowe na temat tego typu zastosowania nanosłupków ZnO pojawiły się po 2000 roku [15,16]. Mając na uwadze również tego typu zastosowania niezwykle istotne jest dogłębne poznanie właściwości materiału oraz zachodzących w nim procesów luminescencyjnych. Dlatego też kolejna praca w cyklu habilitacyjnym dotyczy charakteryzacji optycznej nanosłupków ZnO. Praca H2 zawiera grupę wyników z pomiarów katodoluminescencji niskotemperaturowej (w temperaturze 5K) oraz zależności temperaturowej (od 5K do temperatury pokojowej). Pierwsza część wyników przedstawionych w tej pracy była zawarta w mojej pracy doktorskiej – badania efektów lokalizacji nośników przy użyciu katodoluminescencji (CL) (zależność temperaturowa pozycji spektralnej maksimum emisji CL, mapy CL), a także badanie jednorodności nanosłupków (analiza pozycji maksimum intensywności wzdłuż nanosłupka) oraz porównanie tych właściwości z właściwościami warstw wysokiej jakości otrzymywanych metodą ALD. Otrzymane wyniki potwierdziły niezwykle wysoką jakość nanosłupków oraz ich jednorodność. Obserwowana luminescencja (jedno pasmo emisyjne) miała charakter ekscytonowy, inne pasma emisyjne związane z defektami krystalograficznymi nie zostały zaobserwowane. Jednakże najważniejsze wyniki zawarte w tej pracy powstały już po otrzymaniu stopnia doktora i właśnie z uwagi na nie praca została włączona do cyklu habilitacyjnego. W przeprowadzonym eksperymencie pobudzano wiązką elektronową pojedyncze nanosłupki. W pierwszy przypadku nanosłupek został oderwany od podłoża i zawieszony na błoncie węglowej, a w drugim przypadku nanosłupek otoczony był innymi nanosłupkami w matrycy (otrzymanie tego typu wyników było możliwe ze względu na połączenie układu CL ze skaningowym mikroskopem elektronowym). Okazało się, że luminescencja w obu przypadkach znacząco się różni.



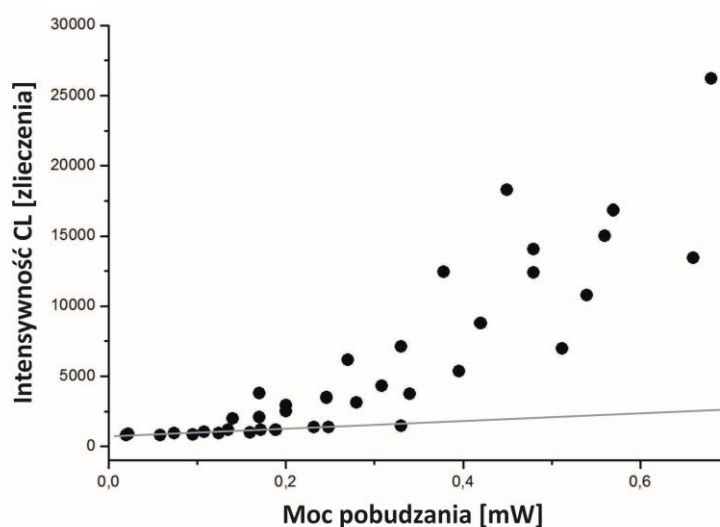
Rys. 4. Widma CL przy pobudzeniu pojedynczego nanosłupka w matrycy (krzywa czarna) i odizolowanego (krzywa czerwona). Widma zmierzono w temperaturze 5K. Rysunek pochodzi z pracy H2.

Pierwsza różnica dotyczy intensywności świecenia. Luminescencja (a w zasadzie katodoluminescencja) odseparowanego nanosłupka była ok. 100 razy mniej intensywna niż w przypadku nanosłupka w matrycy (rys. 4), przy pobudzeniu pojedynczego nanosłupka i przy zastosowaniu takiej samej mocy pobudzenia. Oczywiście różnicę intensywności można tłumaczyć tym, że w matrycy część elektronów z wiązki poprzez rozpraszanie i dyfuzję dociera i pobudza również inne nanosłupki w pobliżu, ale różnica nie powinna być tak ogromna. Druga różnica związana jest z charakterem świecenia. Dla odseparowanego nanosłupka widoczne są dwa pasma emisyjne. Na podstawie dostępnych wyników fotoluminescencji stwierdziliśmy, że pierwsze (wyżej energetyczne) pasmo jest związane ze swobodnym ekscytonem, natomiast drugie z ekscytonem związanym na neutralnym donorze [17] (rys. 5).



Rys. 5. Znormalizowane (do identycznej intensywności) widma CL przy pobudzeniu pojedynczego nanosłupka w matrycy i odizolowanego. Widma zebrane w temp. 5K.

W przypadku nanosłupka w matrycy widoczne jest tylko jedno pasmo o mniejszej szerokości połówkowej niż w przypadku odseparowanego nanosłupka. Zaobserwowane różnice sugerują dodatkowy mechanizm wzmocnienia luminescencji nanosłupków w matrycy. Jako potencjalne wyjaśnienie tego zjawiska zostało zaproponowane zjawisko superradiacji [18]. W przypadku pobudzania nanosłupka w matrycy prawdopodobnie wiele nanosłupków w pobliżu miejsca pobudzania jest w „stanie wzbudzonym” (w wyniku transferu energii), co może prowadzić do sprzęgania się ich luminescencji. Pojawienie się tego zjawiska powinno mieć wpływ na dynamikę luminescencji, jednak jej pomiar nie był możliwy w użytym układzie pomiarowym. Przeprowadzony został jednak inny eksperyment – zmierzono intensywność emisji z matrycy nanosłupków w funkcji mocy pobudzania startując z bardzo małych mocy, dla których pobudzenie kilku sąsiadujących nanosłupków było mało prawdopodobne (rys. 6). W takim przypadku zależność intensywności świecenia od mocy pobudzania powinna być liniowa.

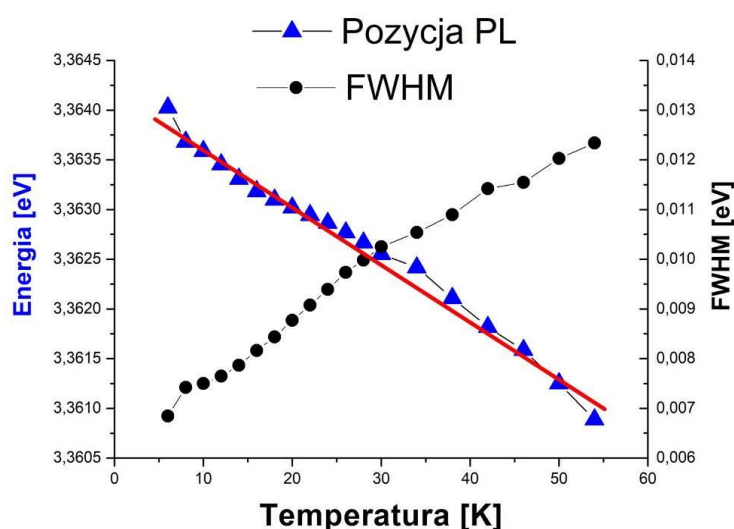


Rys. 6. Sumaryczna liczba zliczeń CL w funkcji mocy pobudzania dla matrycy nanosłupków. Rysunek pochodzi z pracy H2.

Dla stosunkowo małych mocy pobudzania intensywność świecenia powoli i liniowo rośnie wraz ze wzrostem mocy pobudzania. Obserwowane jest klasyczne zjawisko niezależnych rekombinacji par elektron-dziura. Wraz z dalszym wzrostem mocy relacja ta zmienia się. Rośnie liczba wzbudzonych nanosłupków i obserwujemy koherentną emisję, o znacznie wyższej intensywności. Zależność ta w przypadku odseparowanego nanosłupka miała zupełnie inny charakter. Wraz ze wzrostem mocy pobudzania obserwowana początkowo zależność liniowa wysycha się i intensywność świecenia coraz wolniej rośnie z mocą pobudzania, co zostało przedstawione w pracy H2. Zaobserwowana zależność dla nanosłupków w matrycy silnie sugeruje pojawienie się efektu superradiacji, ale ostatecznie potwierdzenie tej tezy wymagać jeszcze będzie dodatkowych pomiarów, w szczególności analizy dynamiki luminescencji. Jednak wyjaśnienie zaobserwowanego zjawiska poprzez efekt superradiacji wydaje się być poprawne. Efekty tego typu były już obserwowane dla układów niskowymiarowych, np. dla układu kropek kwantowych [19].

Kolejna praca w cyklu habilitacyjnym dotyczy charakteryzacji optycznej nanosłupków ZnO przy pomocy pomiarów fotoluminescencji. W szczególności wykorzystano pomiary zależności temperaturowej widma PL, które podobnie jak w przypadku pomiarów CL, było zdominowane przez

emisję o charakterze ekscytonowym. Analiza widm PL, których kształt wskazywał na wielopasmowy charakter, została wykonana poprzez przybliżenie poszczególnych składowych pasm emisyjnych funkcją Gaussa (standardowo stosowane przybliżenie dla widm PL). Dzięki temu możliwa była identyfikacja poszczególnych pasm emisyjnych oraz oszacowanie ich szerokości połówkowych. Dominujące pasmo zostało zidentyfikowane jako świecenie ekscytynu związanego na donorze (DBE) [17]. Następnie analizie poddana została pozycja energetyczna i szerokość połówkowa poszczególnych pasm wraz ze wzrostem temperatury (startując od temperatury 6K). Tego typu analizy służą do oszacowania roli fluktuacji potencjału i lokalizacji nośników. W przypadku dużej roli tych efektów obserwowany jest charakterystyczne zachowanie zależności energii pasma w funkcji temperatury zwanej „S-shape” [20] (widzianej, np. dla warstw ZnO [21]). W przypadku nanosłupków taka zależność nie wystąpiła. Szerokość połówkowa pasma DBE liniowo rośnie wraz z temperaturą, co jest charakterystyczne dla rozpraszania ekscytonowo-fononowego charakterystycznego dla wysokiej jakości materiału (rys. 7).



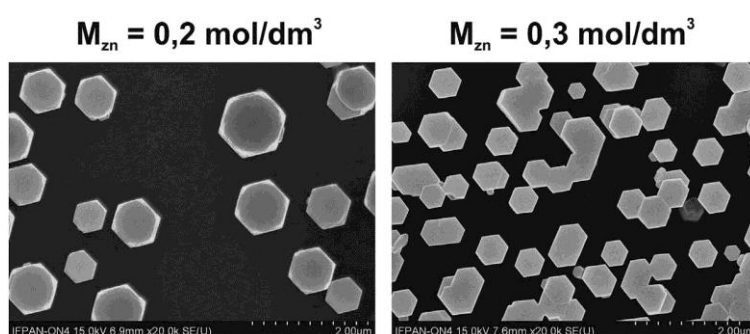
Rys. 7. Pozycja energetyczna pasma DBE oraz jego szerokość połówkowa w funkcji temperatury. Rysunek pochodzi z pracy H3.

Dodatkowo określono siłę sprzężenia ekscytonowo-fononowego, które było znacznie silniejsze niż w układach o dużych fluktuacjach potencjału. Przedstawione w pracy H3 pomiary PL są dopełnieniem pomiarów CL. Obie prace potwierdzają wysoką jakość wytwarzanych nanosłupków, co jest kluczowe w zastosowaniach optoelektronicznych.

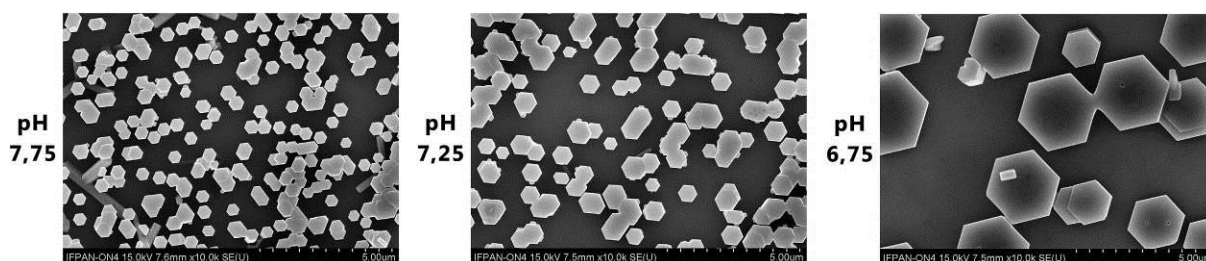
Ogromny potencjał aplikacyjny w urządzeniach optoelektronicznych mają również heterostrukтуры ZnO-GaN. Oba materiały mają podobną przerwę energetyczną, taką samą strukturę krystalograficzną oraz podobne stałe sieciowe. W literaturze można znaleźć wiele publikacji pokazujących potencjał takich heterostruktur, w szczególności w zastosowaniach w diodach LED [22,23]. Jednak tego typu zastosowania wymagają dodatkowej optymalizacji technologii. Z uwagi na to zostały podjęte badania nad epitaksjalnym wzrostem nanosłupków ZnO na podłożach z azotku galu.

4.6 Wzrost i właściwości nano/mikrosłupków wzrastanych epitaksjalnie na podłożach z azotku galu (H4, H5)

Kolejne dwie prace cyklu dotyczą nano/mikrosłupków ZnO wzrastanych epitaksjalnie na krystalograficznie dopasowanym podłożu z azotku galu za pomocą opracowanej przeze mnie metody hydrotermalnej. Możliwość wzrostu takich struktur została jedynie zademonstrowana w mojej pracy doktorskiej, a praca H4 stanowi rozwinięcie tego tematu przedstawiając możliwości wzrostu i jego kontroli, a także charakteryzację zorientowanych nanosłupków. W szczególności praca H4 pokazuje, że podobnie jak w przypadku wzrostu nanosłupków na niedopasowanych krystalograficznie podłożach, również w przypadku dopasowanego podłoża kontrola wzrostu nie odbywa się poprzez czas trwania procesu, a jedynie poprzez parametry chemiczne jak wartość współczynnika pH roztworu czy stężenie cynku (rys. 8 i 9).



Rys. 8. Zdjęcia SEM nano/mikrosłupków ZnO dla różnych stężeń cynku w roztworze wykorzystanym do wzrostu. Zdjęcia pochodzą z pracy H4.

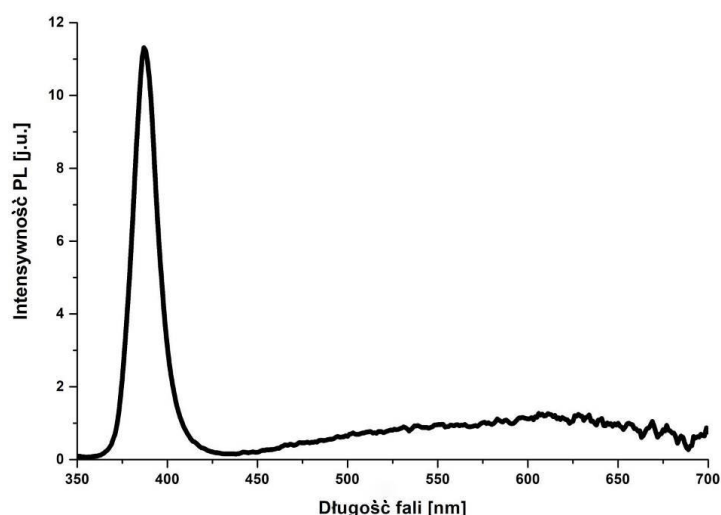


Rys. 9. Zdjęcia SEM nano/mikrosłupków ZnO dla różnych wartości współczynnika pH roztworu wykorzystanego do wzrostu. Zdjęcia pochodzą z pracy H4.

Mechanizm wzrostu nanosłupków ZnO został wstępnie zaproponowany w mojej pracy doktorskiej. Temat ten był przedmiotem dalszych analiz już po uzyskaniu stopnia doktora. W wyniku tych prac został opracowany model wzrostu, który jest najbliższy modelowi zaproponowanemu przez W. Li [24], jednak w naszym przypadku został on nieco zmodyfikowany. Został on przedstawiony w pracy H4. Zaproponowany model wyjaśnia dość złożoną zależność wpływu wartości pH roztworu na rozmiary nanosłupków. W skrócie – dla niższych wartości pH dominującą formą cynku jest $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, a jej reakcja z powierzchniowymi grupami OH jest siłą napędową wzrostu. Wzrost wartości pH powoduje rozpoczęcie dysocjacji octanu cynku, a pośrednio pojawienie się octanu sodu, która blokuje wzrost nanosłupków na niepolarnych płaszczyznach (ściany boczne). Dlatego dla wyższych wartości pH nanosłupki mają wysoki stosunek wysokości do średnicy.

Wpływ stężenia cynku na gęstość nanostruktur jest stosunkowo łatwy do wyjaśnienia. Dla większego stężenia cynku rośnie prawdopodobieństwo utworzenia wiązania cynku z powierzchnią prowadząc tym samym do większej liczby nanostruktur.

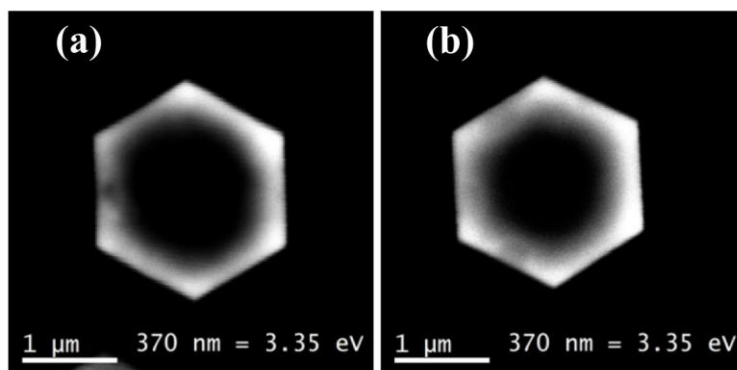
Ponadto w pracy H4 została przedstawiona charakteryzacja otrzymanych nanosłupków. Widoczna na zdjęciach mikroskopowych orientacja nanosłupków oraz jej związek z orientacją podłoża z azotku galu zostały potwierdzone badaniami dyfrakcji rentgenowskiej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej. Idealny heksagonalny kształt nanostruktur, charakterystyczny dla struktury wurcytu, sugeruje wysoką jakość materiału. Jednak pomiary fotoluminescencji obok silnego pasma o charakterze ekscytonowym ujawniły również szerokie pasmo emisyjne związane z defektami (rys. 10). Defekty te są najprawdopodobniej związane z błędami ułożenia (ang. stacking faults), które zostały przedstawione na zdjęciach z transmisyjnej mikroskopii elektronowej. Nieco gorsza jakość krystalograficzna epitaksjalnych nanosłupków jest prawdopodobnie związana z niewielkim niedopasowaniem sieciowym ZnO z podłożem GaN (ok. 1,9%), co powoduje powstanie naprężeń, a te z kolei generują błędy ułożenia w kryształach. Był to dość zaskakujący wynik pomiarowy, w przypadku nanosłupków wzrastających na silnie niedopasowanych krystalograficznie podłożach (bez relacji epitaksjalnej) obecność tego typu defektów nie została zaobserwowana, a jakość krystalograficzna nanostruktur była bardzo wysoka.



Rys. 10. Widmo fotoluminescencji zorientowanych nanosłupków ZnO na podłożu GaN. Rysunek pochodzi z pracy H4.

Praca H5 stanowi oryginalną kontynuację badań właściwości optycznych zorientowanych nano/mikrosłupków na podłożach z azotku galu. Omówiona jest możliwość wykorzystania mikrosłupków ZnO jako rezonatory optyczne, wykorzystując w szczególności wykazaną wcześniej wysoką jakość krystalograficzną oraz charakter ich luminescencji. W szczególności praca H5 skupia się na analizie katodoluminescencji indywidualnych mikrosłupków, wykazując korelację właściwości optycznych z rozmiarami i kształtem struktur. Mikrosłupki ZnO, ze względu na swoją geometrię, mogą służyć jako naturalne rezonatory optyczne. Sześć ścian bocznych mikrosłupka może służyć jako lustro „zamykając” światło wewnątrz wzmacniając mody rezonansowe krążącego światła. Oczywiście światło nie krąży wewnątrz w nieskończoność, ale stopniowo jest wypromieniowywane w okolicach rogów i ścian bocznych. Pobudzając wiązką środek mikrosłupka generowane światło ma małe prawdopodobieństwo wejścia w mod rezonansowy ze względu na wysoki kąt padania na ściany

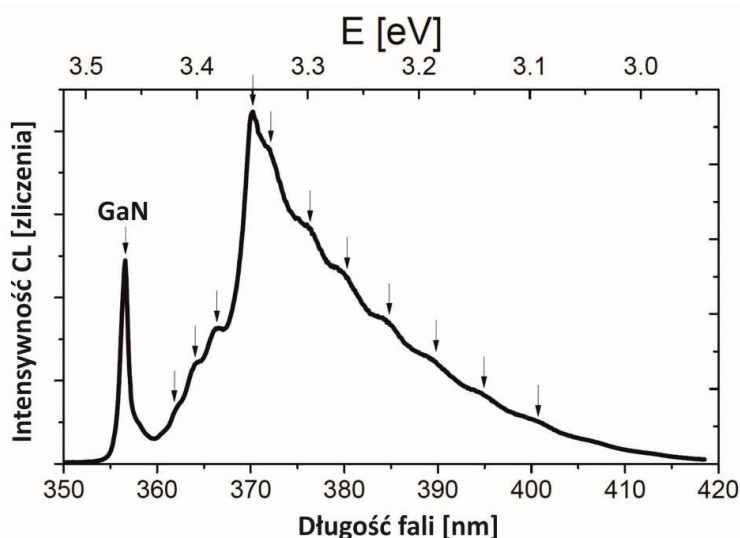
boczne. Jednak przy pobudzenie w okolicach ścian bocznych czy wierzchołków prawdopodobieństwo wystąpienia modu rezonansowego znacznie wzrasta co tłumaczy mapy świecenia CL widoczne na rys. 11. Praca H5, przedstawiająca dokładną analizę tego efektu, jest częścią przygotowywanego doktoratu Agnieszki Pieniżek, której jestem promotorem pomocniczym. Kontynuowane są badania tego fascynującego zjawiska. Należy tutaj zaznaczyć, że mody rezonansowe obserwowane były dotychczas dla nanostruktur o najwyższej jakości krystalograficznej wykonanych kosztownymi metodami technologicznymi [25,26,27].



Rys. 11. Monochromatyczne mapy CL mikrosłupków ZnO. Rysunek pochodzi z pracy H5.

Mapy świecenia została wykonana dla światła o długości fali około 370 nm, ponieważ badane mikrosłupki charakteryzowały się jedynie luminescencją o charakterze ekscytonowym.

Dokładne widmo zebrane dla stosunkowo dużego nansłupka (o szerokości 2,24μm) pokazało jego wielopasmowy charakter (rys 12).

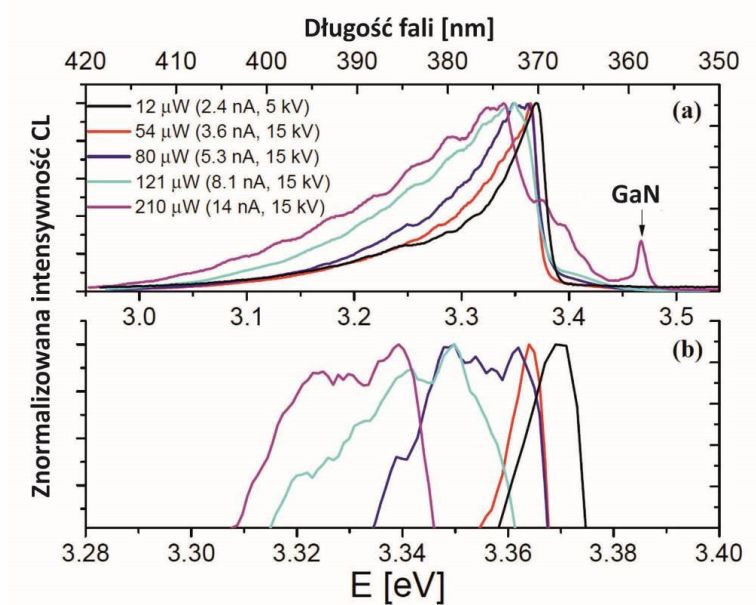


Rys. 12. Widmo CL zebrane dla pojedynczego mikrosłupka ZnO w temp. 5K. Rysunek pochodzi z pracy H5.

Analiza odległości energetycznych pomiędzy poszczególnymi pasmami wykluczyła powtórzenia fononowe jako ich źródło. Wyjaśnienie charakteru widma zostało oparte na prostym modelu falowym, zakładając współistnienie modów rezonansowych o charakterze elektrycznym i magnetycznym. Przedstawiona analiza wraz z wynikami eksperymentalnymi dla różnych rozmiarów nano/mikrosłupków (2,24μm, 1,49μm i 532 nm) wykazała wpływ rozmiarów wnęki na mody

rezonansowe. Wraz ze wzrostem szerokości wnęki mody rezonansowe stają się bardziej widoczne, co jest związane z mniejszymi stratami optycznymi. Efekt rozmiaru wnęki może być wyjaśniony za pomocą modelu fali płaskiej. Wzmocnienie rezonansowe pojawia się wówczas, kiedy rozmiar wnęki i długość fali spełniają warunek interferencji konstruktywnej. Dla najmniejszej wnęki model przestaje działać, ponieważ wnęka ma rozmiary porównywalne z długością fali i w takim przypadku mody rezonansowe nie występują.

Ponadto praca przedstawia analizę luminescencji mikrosłupków w funkcji mocy pobudzenia. Ze względu na możliwość lokalnego dostarczenia dużej mocy pobudzenia w CL oraz pojawianie się modów rezonansowych wzmacniających luminescencję została przedstawiona możliwość przejścia z luminescencji ekscytonowej do luminescencji plazmy elektronowo-dziurowej, co jest niezwykle istotne w kontekście ewentualnych zastosowań laserowych. Wraz ze wzrostem mocy pobudzenia luminescencja poszerza się spektralnie, pojawiają się nowe pasma emisyjne po stronie dłuższych długości fali, a dominujące pasmo przesuwają się w kierunku niższych energii co jest typowym zjawiskiem przy emisji plazmy elektronowo-dziurowej (rys. 13).



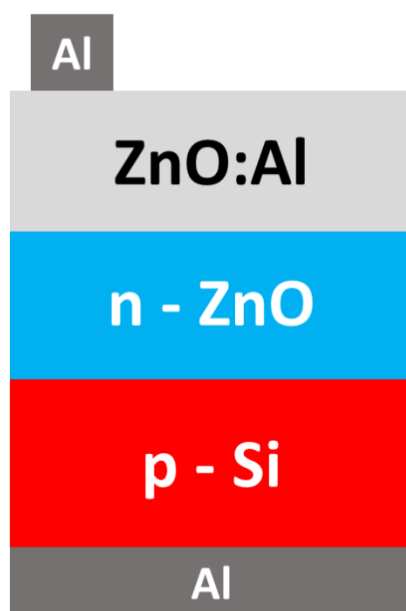
Rys. 13. Widma CL mikrosłupka ZnO o szerokości 2,24 μm dla różnych mocy pobudzenia CL. Rysunek pochodzi z pracy H5.

Przedstawione analizy CL dowodzą, iż pomimo bardzo prostej, taniej i szybkiej technologii wzrostu otrzymane struktury charakteryzują się bardzo wysoką jakością krystalograficzną i możliwe jest zaobserwowanie w nich takich efektów luminescencyjnych jak mody rezonansowe czy luminescencja plazmy elektronowo-dziurowej.

Rozwijając możliwości metody wzrostu nanostruktur zainteresowaliśmy się ideą implementacji nanosłupków w konstrukcję ogniw fotowoltaicznych, dla których demonstrowane były ciekawe rezultaty, np. praca z Lund University [28], w której przedstawiono zastosowanie nanosłupków InP. Z biegiem czasu tematyka ogniw fotowoltaicznych stała się dla nas jednym z głównych obszarów prac badawczych.

4.7 Zastosowanie nanosłupków ZnO w ogniwach fotowoltaicznych (H6, H7, H8)

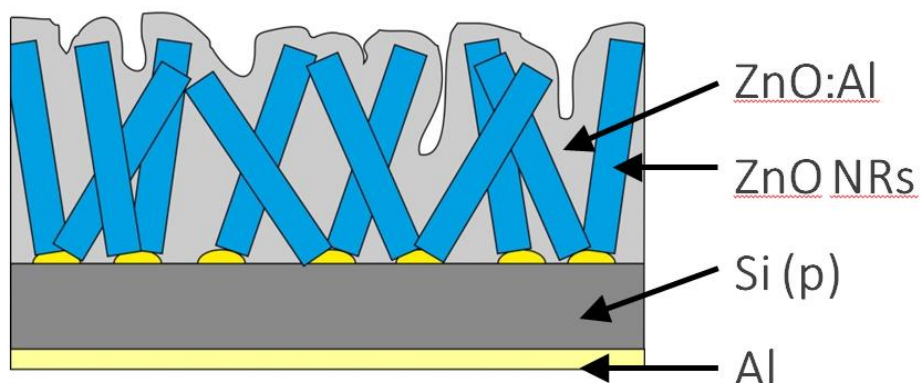
Kolejne trzy prace w cyklu dotyczą zastosowania nanosłupków w architekturze ogniw fotowoltaicznych. Te prace były przedmiotem doktoratu Rafała Pietruszki, którego byłem promotorem pomocniczym. Nasza grupa badawcza zaproponowała nową architekturę ogniw fotowoltaicznych [29], również opartych na krzemie, ale stanowiących alternatywę dla klasycznych ogniw krzemowych. Architektura ta oparta została na krzemowym podłożu typu p, a złącze p-n tworzone jest z warstwą ZnO typu n osadzaną metodą ALD. Tego typu podejście miało na celu wyeliminowanie procesów technologicznych związanych z tworzeniem warstwy przewodnictwa typu n na powierzchni krzemu, które są energochłonne i kosztowne. Wymagana jest implantacja przypowierzchniowej warstwy krzemu fosforem, a następnie jest wygrzewanie. Wprawdzie tlenek cynku ma szeroką przerwę energetyczną w obszarze spektralnym ultrafioletu i nie jest w stanie absorbować światła z zakresu widzialnego, jednak może tworzyć bardzo wydajne złącze z krzemem, w którym odbywa się absorpcja światła.



Rys. 14. Schemat architektury ogniw opartego na złączu Si/ZnO.

Dodatkowo na warstwie ZnO typu n została osadzona warstwa ZnO domieszkowanego glinem (AZO), która charakteryzuje się wysoką transparentnością i przewodnictwem tworząc wydajną przezroczystą elektrodę (rys. 14). Struktury tego typu po optymalizacji grubości warstw uzyskały wydajność fotowoltaiczną ok. 6% [29].

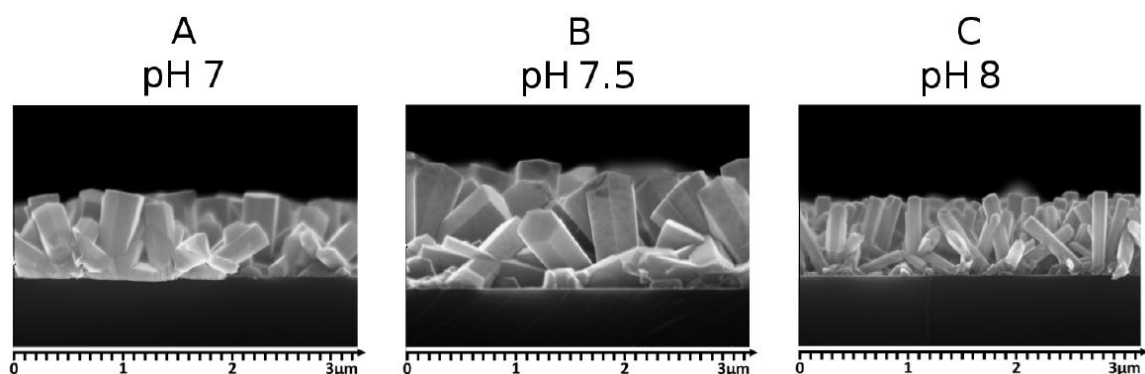
Praca H6 przedstawia pierwszą próbę zastosowania nanosłupków do struktury przedstawionej na rys. 14. z tą różnicą, że warstwa n-ZnO otrzymywana metodą ALD została zastąpiona nanosłupkami ZnO. Schemat takiej struktury został przedstawiony na rys. 15.



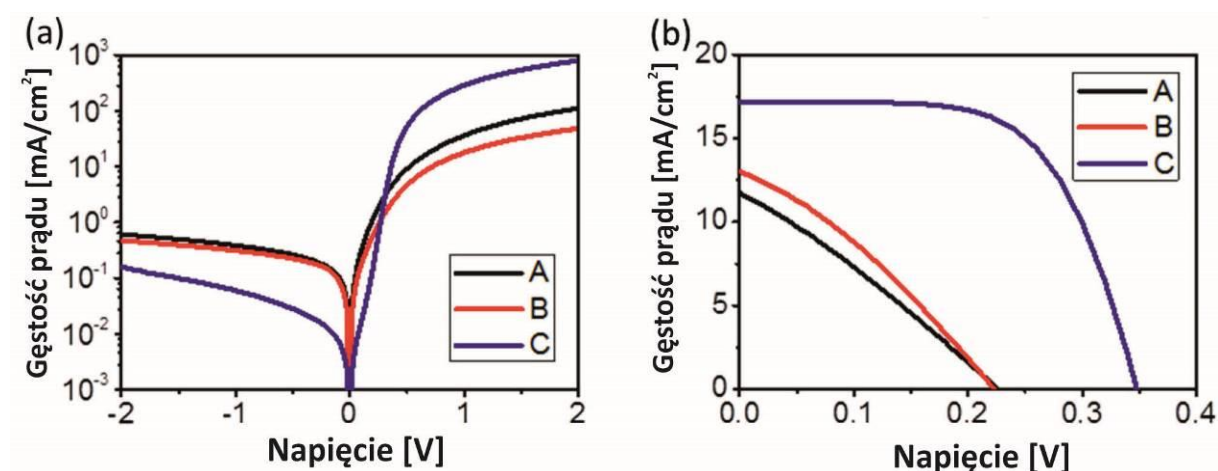
Rys. 15. Schemat struktury ogniwa Si/nanosłupki ZnO/AZO.

Idea zastosowania nanosłupków w takiej architekturze ogniwa została oparta na kilku założeniach. Po pierwsze w tego typu strukturach oprócz samej generacji par elektron-dziura niezwykle ważnym aspektem jest ich separacja. W przypadku warstwy ZnO o naturze polikrystalicznej często może dochodzić do rekombinacji powstałych nośników np. na granicach ziaren, przez co tracona jest część generowanego prądu. Nanosłupki ZnO ze względu na swoją wysoką jakość krystalograficzną i geometrię mogą tworzyć swego rodzaju kanały wydajnie odprowadzające ładunki z obszaru złącza, ograniczając w ten sposób straty nośników. Drugim powodem, również związanym z wysoką jakością, jest niska koncentracja nośników (niższa niż w przypadku warstw ZnO-ALD), która skutkuje poszerzeniem obszaru efektywnego złącza, w szczególności również po stronie ZnO. Z tego powodu dla ogniw z wykorzystaniem nanosłupków widoczna jest polepszona absorpcja światła dla krótszych długości fali. Trzecim powodem zastosowania nanosłupków jest polepszenie zbierania światła (naturalnie chropowata powierzchnia). Dodatkowo metoda wzrostu nanosłupków nawet w stosunku do niskokosztowej metody ALD stanowi znacznie tańszą alternatywę do strukturyzacji stosowanej przy produkcji ogniw krzemowych. W tym przypadku krzem trawiony jest przy użyciu agresywnych związków chemicznych szkodliwych dla środowiska.

Zostały sprawdzone różne warianty nanosłupków (dla różnych wartości pH roztworu – 7, 7,5 oraz 8, co determinuje rozmiary i gęstość nanosłupków). Najlepsze rezultaty otrzymano dla pH o wartości 8, dla którego nanosłupki były najmniejsze oraz najgęstsze (rys. 16 i 17).

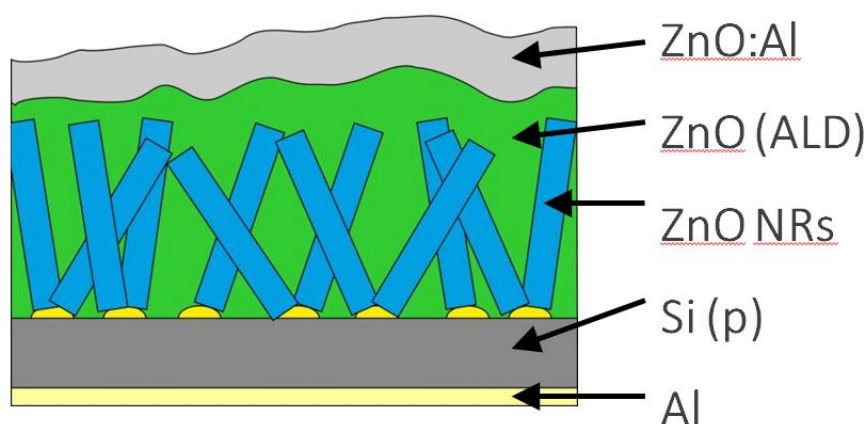


Rys. 16. Zdjęcia SEM nanosłupków dla różnych wartości współczynnika pH roztworu użytego do wzrostu. Rysunek pochodzi z pracy H6.



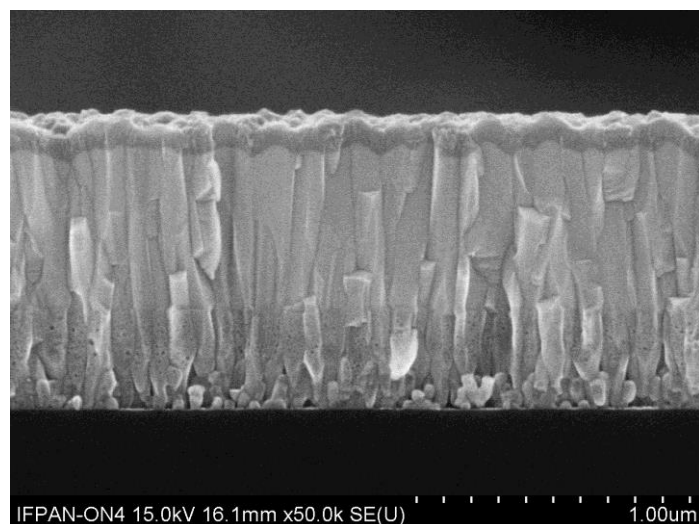
Rys. 17. Charakterystyki prądowo-napięciowe dla próbek zawierających nanosłupki wzrastane dla różnych wartości współczynnika pH roztworu pod wpływem światła (A: pH = 7, B: pH = 7,5, C: pH = 8). Rysunek pochodzi z pracy H6.

Uzyskana wydajność ogniwa wyniosła zaledwie 3,6% co w stosunku do struktury planarnej nie było przełomowym rezultatem. Sytuacja ta mogła być związana z powierzchnią efektywnego złącza – nanosłupki nie pokrywają jednorodnie całej powierzchni krzemu (między nanosłupkami występują wolne przestrzenie), co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia efektywnej powierzchni złącza, w której separowane są pary elektron-dziura. W wyniku tej analizy tego problemu struktura ogniwa została zmodyfikowana, a otrzymane rezultaty zostały opisane w kolejnej pracy z cyklu - H7. Wykorzystując główną zaletę metody ALD – jednorodność pokrycia warstwą nawet najbardziej rozbudowanych powierzchniowo struktur, przestrzenie pomiędzy nanosłupkami (w tym obszary powierzchni krzemu, które wcześniej nie tworzyły efektywnego złącza) zostały wypełnione dodatkową warstwą ZnO. Dzięki temu cała powierzchnia krzemu zaczęła tworzyć efektywne złącze (rys. 18).



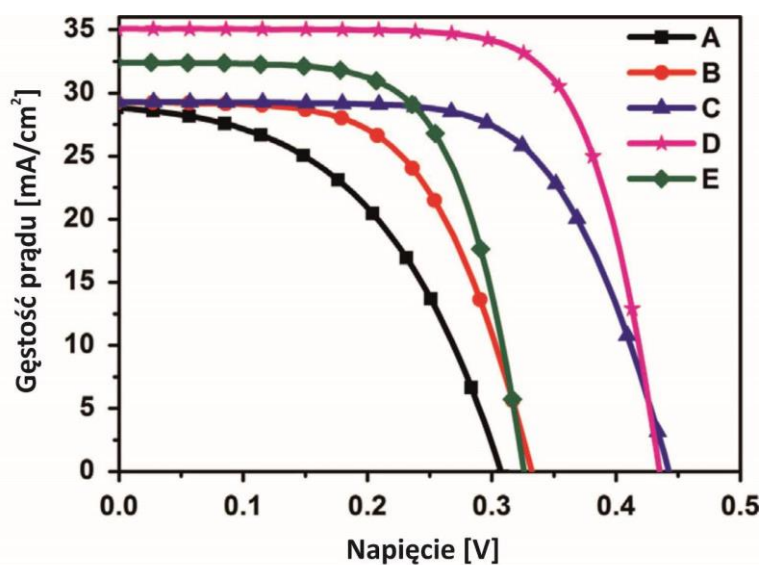
Rys. 18. Schemat struktury ogniwa Si/nanosłupki ZnO/ZnO - ALD/AZO.

W takim rozwiązaniu zastosowanie nanosłupków ZnO ma dodatkowy atut - warstwa ZnO wzrastana metodą ALD na nanosłupkach charakteryzuje się znacznie wyższą jakością niż w przypadku wzrostu bezpośrednio na krzemie. Warstwa ZnO-ALD w tym przypadku kontynuuje wzrost kolumnowy przedłużając i poszerzając nanosłupki (rys. 19).



Rys. 19. Zdjęcie SEM struktury ogniwa Si/nanosłupki ZnO/ZnO - ALD/AZO. Rysunek pochodzi z pracy H7.

W pracy H7 zostało przedstawione porównanie próbek dla różnych grubości dodatkowej warstwy ZnO wypełniającej przestrzeń między nanosłupkami. W każdym przypadku zastosowanie takiego rozwiązania znacząco poproowało uzyskane rezultaty (rys. 20).

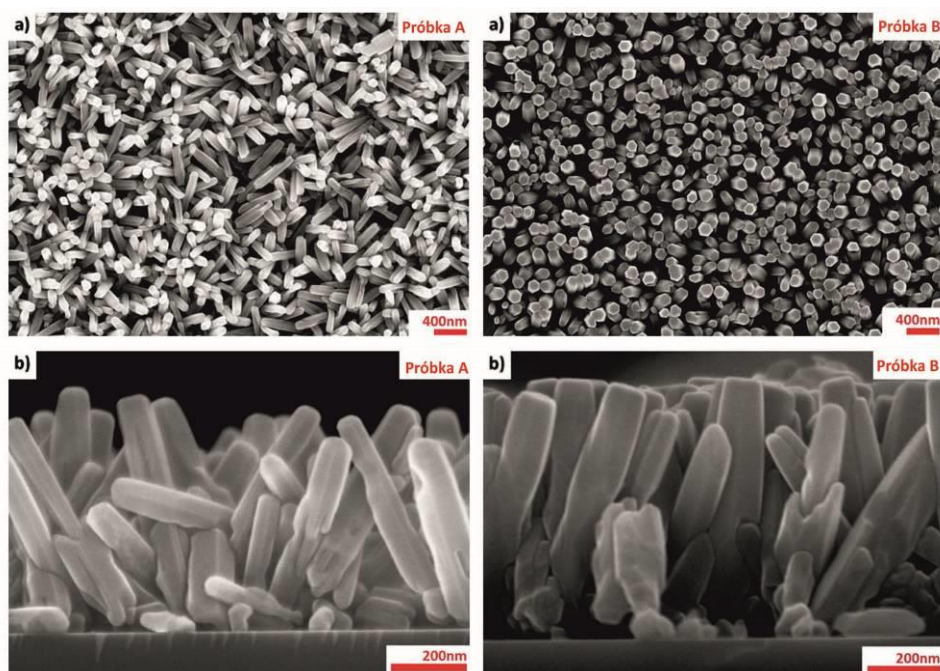


Rys. 20. Charakterystyki prądowo napięciowe pod wpływem oświetlenia dla struktur o różnych grubościach dodatkowej warstwy ZnO (A – 50nm, B – 100nm, C – 300nm, D – 500 nm, E – 800nm). Rysunek pochodzi z pracy H7.

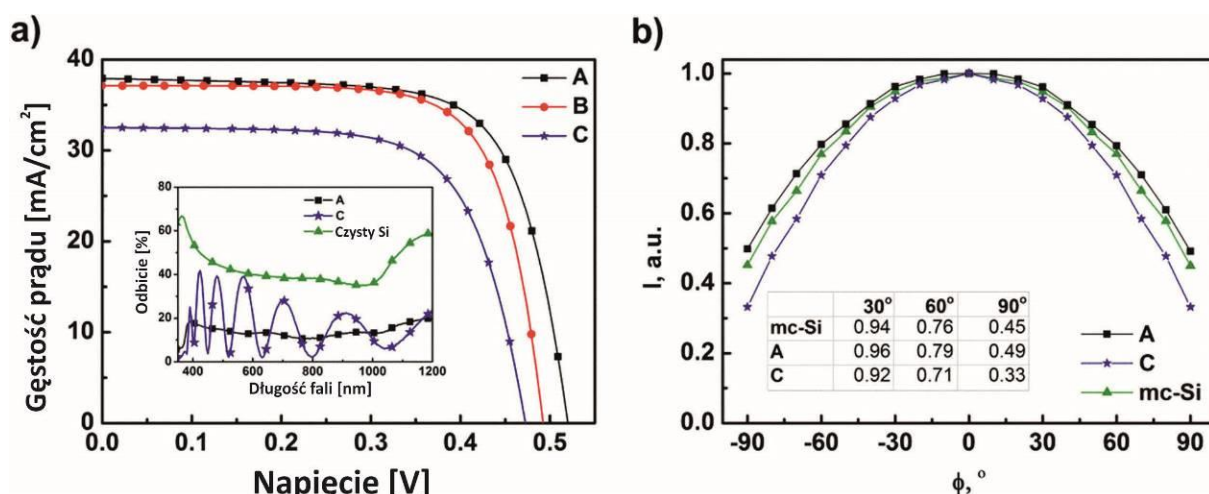
Wytworzone ogniwo z warstwą ZnO o grubości ok. 500 nm wykazało wydajność prawie 11% (pomiar wykonany przy użyciu symulatora słońca), co stanowiło ogromny postęp w stosunku do pierwszej próby zastosowania nanosłupków.

Kontynuacja prac grupy w tym temacie dotyczyła inżynierii dopasowania pasmowego złącza krzem-ZnO. W celu poprawienia jakości złącza (jeszcze silniejsze obniżenie koncentracji nośników po stronie ZnO) wykorzystano warstwę ZnO domieszkowaną magnezem, zamiast warstwy ZnO [30], co wcześniej spowodowało wzrost wydajności ogniwa planarnego. To rozwiązanie zastosowano również w ogniwach z udziałem nanosłupków ZnO. Kolejna praca cyklu (H8) przedstawia porównanie ogniwa

planarnego (przy zastosowaniu architektury Si/ZnO:Mg/AZO) z ogniwami zawierającymi nanosłupki (Si/ZnO NRs/ZnO:Mg/AZO), przy czym sprawdzono również wpływ gęstości nanosłupków na wydajność ogniwa (rys. 21). Zastosowane rozwiązanie doprowadziło do kolejnego znacznego wzrostu wydajności ogniwa, która dla najlepszej próbki wyniosła aż 14% (rys. X15 a). Najlepszą wydajność uzyskano dla nanosłupków o gęstszym upakowaniu, ale w obu przypadkach wydajność była wyższa niż dla struktury planarnej, dla której wyniosła 10,5%. Te wyniki uzyskano m.in. przy punktowym górnym kontakcie i bez optymalizacji grubości krzemu, istnieje zatem jeszcze wiele dróg dalszej optymalizacji.



Rys. 21. Zdjęcia SEM nanosłupków, na podstawie których wykonano ogniwa o oznaczenia A (nanosłupki o małej gęstości) i B (nanosłupki gęsto upakowane). Rysunek pochodzi z pracy H8.



Rys. 22. a) Zależności prądowo-napięciowe dla próbek z różnymi nanosłupkami A i B (nanosłupki przedstawione na rys. 21) oraz referencyjnym ogniwem planarnym – C. Wkład do wykresu przedstawia odbicie światła od próbek i czystego krzemu. b) Porównanie zależności kątowej względnej wydajności dla ogniwa z nanosłupkami, referencyjnego ogniwa planarnego oraz komercyjnego ogniwa krzemowego z nanostrukturacją powierzchni. Rysunki pochodzą z pracy H8.

Dodatkowo pokazano, że zastosowanie nanosłupków wpływa w szczególności również na zmniejszenie odbicia światła padającego, szczególnie dla dużych kątów nawet w stosunku do komercyjnego ogniwa o strukturyzowanej powierzchni (rys. 22 b).

Wyniki przedstawione w pracach H6, H7 i H8 są kolejnymi etapami optymalizacji konstrukcji ogniw PV powstałymi w wyniku analizy procesów fizycznych zachodzących w ogniwach (a także aspektów technologicznych ich wytwarzania), które w rezultacie prowadzą do coraz lepszych mierzonych sprawności. Początkowo przyjęte założenia, będące punktem wyjściowym dla prac technologicznych, okazały się poprawne, a wydajność ogniw przy zastosowaniu nanosłupków ZnO wykazała wzrost o kilka punktów procentowych (w stosunku do architektury planarnej). Przedstawione prace mają duże znaczenie praktyczne. Aktualnie są one kontynuowane w ramach programu otrzymanego w konkursie TechMatStrateg (finansowany przez NCBiR) przy udziale partnera przemysłowego.

4.8 Przegląd potencjalnych zastosowań nanosłupków ZnO [H9]

Praca H9 w cyklu habilitacyjnym jest dodatkową pracą, która wprawdzie nie zawiera moich nowych wyników, lecz stanowi przegląd opisujący potencjalne zastosowania nanosłupków tlenku cynku. W szczególności praca przedstawia zastosowania w emiterach światła (diody i lasery), w detektorach światła (na pojedynczych nanosłupkach oraz na matrycach), w ogniwach fotowoltaicznych (ogniwa barwnikowe, perowskitowe, cienkowarstwowe, organiczne oraz krzemowe), w zastosowaniach fotokatalitycznych, w emiterach polowych, w tranzystorach typu FET, w detektorach gazów (redukujących i oksydujących), substancji chemicznych i biologicznych oraz w konstrukcji nanogeneratorów mocy. W szczególności w rozdziałach dotyczących detektorów światła i ogniw fotowoltaicznych osiągnięcia moje i moich współpracowników zostały umieszczone na tle innych grup badawczych. Praca pojawiła się w cyklu habilitacyjnym, ponieważ zawarta w niej analiza stanu technologicznego jest swego rodzaju uzasadnieniem podjęcia prac badawczych związanych z technologią wzrostu nanosłupków. Mianowicie nanosłupki ZnO są przedstawiane w wielu dziedzinach fizyki jako niezwykle obiecujące nanostruktury dla wielu aplikacji. Od dwudziestu lat prototypowe urządzenia z ich wykorzystaniem demonstrowane są w skali laboratoryjnej. Niestety do tej pory nanosłupki ZnO nie znalazły prawdziwego, komercyjnego zastosowania. Zawarta w pracy H9 analiza tej kwestii sugeruje, iż źródło tego problemu związane jest z używanymi metodami wzrostu i rozwiązaniami technologicznymi (często złożone procedury), które dostarczają niezwykle ciekawych wyników w skali laboratoryjnej, ale niestety nie spełniają wymogów zastosowania przemysłowego. Pojawienie się prostej, szybkiej, nietoksycznej i skalowalnej metody wzrostu nanosłupków ZnO, pozwalającej na otrzymywanie struktur o wysokiej jakości powinno umożliwić przemysłowe zastosowania. Uważam, że metoda, która została przedstawiona w mojej pracy doktorskiej i rozwijana w kolejnych latach spełnia te wymagania. Przedstawiona charakterystyka otrzymanych struktur oraz przykłady aplikacji, w szczególności w kontekście zastosowania w ogniwach fotowoltaicznych są tego potwierdzeniem.

4.9 Podsumowanie – najważniejsze osiągnięcia

- Zaproponowanie mechanizmu zmian oporności struktury nanosłupki ZnO/krzem pod wpływem światła widzialnego – praca H1
- Charakteryzacja właściwości optycznych nanosłupków ZnO za pomocą katodoluminescencji i fotoluminescencji. W szczególności demonstracja różnic luminescencji dla odseparowanego nanosłupka oraz nanosłupka w matrycy przy zachowaniu mocy pobudzania, a także wykazanie możliwości wystąpienia zjawiska luminescencji kolektywnej dla matrycy nanosłupków – prace H2 i H3
- Demonstracja możliwości wzrostu epitaksjalnych nanosłupków na podłożach GaN oraz zaproponowanie mechanizmu wzrostu nanostruktur w procesie hydrotermalnym – praca H4
- Wykazanie wysokiej jakości mikrosłupków poprzez obserwację efektów luminescencyjnych jak mody rezonansowe czy luminescencja plazmy elektronowo-dziurowej – praca H5
- Demonstracja wzrostu wydajności ogniw fotowoltaicznych po wprowadzeniu nanosłupków ZnO do ich architektury – prace H6, H7 i H8

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.

5.1 Opis dorobku naukowego nie związanego z tematem habilitacji

Znaczna część mojego dorobku naukowego nie związanego z tematem habilitacji dotyczy charakteryzacji materiałów i struktur metodami skaningowej mikroskopii elektronowej, wraz z technikami towarzyszącymi - EDS (ang. Energy Dispersive Spectroscopy) i katodoluminescencją (w sumie 73 publikacje z bazy JCR). Zakres tych prac oraz przekrój materiałów, które charakteryzowałem jest bardzo obszerny, można jednak w tej grupie wyłonić kilka tematów, które stanowią stałą współpracę naukową. Jedną z takich grup tematycznych są nanoproszki z materiałów tlenkowych domieszkowane jonami ziem rzadkich, optymalizowane pod kątem zastosowań w diagnostyce i terapii chorób nowotworowych. Od wielu lat współpracuję w tej tematyce m.in. z dr. Jarosławem Kaszewskim (IFPAN) i dr. hab. Michałem Godlewskim (SGGW), kompleksowo charakteryzując wytwarzane nanomateriały, co zaowocowało licznymi publikacjami w tej dziedzinie, m.in:

- J. Kaszewski, **B.S. Witkowski**, L. Wachnicki, H. Przybylińska, B. Kozankiewicz, E. Mijowska, M. Godlewski, Luminescence enhancement in nanocrystalline Eu_2O_3 nanorods - Microwave hydrothermal crystallization and thermal degradation of cubic phase, Optical Materials 59, 76-82 (2016)
- J. Kaszewski, M.M. Godlewski, **B.S. Witkowski**, A. Słowska, E. Wolska-Kornio, Ł. Wachnicki, H. Przybylińska, B. Kozankiewicz, A. Szal, M.A. Domino, E. Mijowska, M. Godlewski, $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$ nanocrystals as biomarkers prepared by a microwave hydrothermal method, Optical Materials 59, 157-164 (2016)

- J. Kaszewski, **B.S. Witkowski**, Ł. Wachnicki, H. Przybylińska, B. Kozankiewicz, E. Mijowska, M. Godlewski,
Reduction of Tb⁴⁺ ions in luminescent Y₂O₃:Tb nanorods prepared by microwave hydrothermal method,
Journal of Rare Earths 34(8), 774-781 (2016)
- J. Kaszewski, E. Borgstrom, **B.S. Witkowski**, Ł. Wachnicki, P. Kielbik, A. Slonska, M.A.Dominoc, U. Narkiewicz, Z. Gajewski, J.-F. Hochepeid, M.M. Godlewski, M. Godlewski,
Terbium content affects the luminescence properties of ZrO₂:Tb nanoparticles for mammary cancer imaging in mice
Optical Materials 74, 16-26 (2017)
- P. Kielbik, J. Kaszewski, J. Rosowska, E. Wolska, **B.S. Witkowski**, M. A.Gralak, Z. Gajewski, M. Godlewski, M.M.Godlewski, Biodegradation of the ZnO:Eu nanoparticles in the tissues of adult mouse after alimentary application
Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine 13 (3), 843-852 (2017)
- J. Olszewski, P. Kielbik, J. Kaszewski, **B.S. Witkowski**, Z. Gajewski, M. Godlewski, M.M. Godlewski
Multimodal non-gadolinium oxide nanoparticles for MRI and fluorescence labelling
Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care VI 10685, 106852M (2018)
- P. Kielbik, J. Kaszewski, **B. S. Witkowski**, Z. Gajewski, M. A. Gralak, M. Godlewski, M. M. Godlewski, Microscopy Science Book Series titled "Microscopy and imaging science: practical approaches to applied research and education", rozdział "Cytometric analysis of Zn-based nanoparticles for biomedical applications", wydawnictwo FORMATEX

Inną grupą tematyczną, w której prowadzę stałą współpracę to charakteryzacja warstw tlenków metali wytwarzanych metodą ALD. Jest to niezwykle szeroki obszar, ponieważ metoda ALD jest główną technologią rozwijaną w naszej grupie badawczej. Brałem udział w optymalizacji całego szeregu warstw tlenkowych, jak: ZnO, ZnO:Al, ZnMgO, ZnO:Cu, ZnO:Co, ZnMgO:Al, Al₂O₃, ZrO₂, TiO₂, HfO₂, opublikowane m.in. w pracach:

- Ł. Wachnicki, T. Krajewski, G. Łuka, **B. Witkowski**, B. Kowalski, K. Kopalko, J.Z. Domagała, M. Guzewicz, M. Godlewski, E. Guzewicz, Monocrystalline Zinc Oxide Films Grown by Atomic Layer Deposition, Thin Solid Films 518 (16), 4556-4559 (2010)
- M. Łukasiewicz, **B. Witkowski**, M. Godlewski, E. Guzewicz, M. Sawicki, W. Paszkowicz, R. Jakiela, T. Krajewski, G. Łuka, Effects related to deposition temperature in ZnCoO films grown by Atomic Layer Deposition – uniformity of Co distribution, structural, electric and magnetic properties, Phys. Status Solidi (b) 247, 1666 (2010)
- G. Łuka, Ł. Wachnicki, **B.S. Witkowski**, T.A. Krajewski, R. Jakiela, E. Guzewicz, M. Godlewski, The uniformity of Al distribution in aluminum-doped zinc oxide films grown by atomic layer deposition, Mat. Sci. Eng. (b) 176 (3), 237-241 (2011)

- M.I. Łukasiewicz, **B.S. Witkowski**, Ł. Wachnicki, K. Kopalko, S. Gieraltowska, A. Wittlin, M. Jaworski, E. Guziewicz, M. Godlewski, (Zn,Cu)O Films by Atomic Layer Deposition - Structural, Optical and Electric Properties, Acta Phys. Pol. A 120 (6A), A34-A36 (2011)
- S. Gieraltowska, L. Wachnicki, **B.S. Witkowski**, T.A. Krajewski, M. Godlewski, E. Guziewicz, Atomic layer deposition grown composite dielectric oxides and ZnO for transparent electronic applications, Thin Solid Films 520 (14), 4694-4697 (2012)
- S. Gieraltowska, Ł. Wachnicki, **B.S. Witkowski**, E. Guziewicz, M. Godlewski, Thin Films of High-k Oxides and ZnO for Transparent Electronic Devices, Chem. Vap. Deposition 19, 213–220 (2013)
- G. Luka, **B.S. Witkowski**, L. Wachnicki, M. Andrzejczuk, M. Lewandowska, M. Godlewski Kinetics of anatase phase formation in TiO₂ films during atomic layer deposition and post-deposition annealing, CrystEngComm 15, 9949 (2013)
- G. Luka, **B.S. Witkowski**, L. Wachnicki, K. Goscinski, R. Jakiela, E. Guziewicz, M. Godlewski, E. Zielony, P. Bieganski, E. Placzek-Popko, W. Lisowski, J.W. Sobczak, A. Jablonski Atomic layer deposition of Zn_{1-x}Mg_xO:Al transparent conducting films, Journal of Materials Science 49 (4), 1512-1518 (2014)
- S. Gieraltowska, L. Wachnicki, **B.S. Witkowski**, R. Mroczynski, P. Dłuzewski, M. Godlewski Characterization of dielectric layers grown at low temperature by atomic layer deposition, Thin Solid Films 577, 97-102 (2015)

W tej grupie tematycznej na szczególną uwagę zasługują badania katodoluminescencji warstw, które stały się moją drugą specjalizacją. Badania te doprowadziły do publikacji wielu artykułów, m.in.:

- **B.S. Witkowski**, M. Łukasiewicz, K. Kopalko, B.J. Kowalski, E. Guziewicz, M. Godlewski Cathodoluminescence Profiling for Checking Uniformity of ZnO and ZnCoO Thin Films Acta Phys. Pol. A 119, 675 (2011)
- **B.S. Witkowski**, Ł. Wachnicki, R. Jakiela, E. Guziewicz, M. Godlewski, Cathodoluminescence Measurements at Liquid Helium Temperature of Poly- and Monocrystalline ZnO Films, Acta Phys. Pol. A 120 (6A), A28-A30 (2011)
- K. Sobczak, P. Dłuzewski, **B.S. Witkowski**, J. Dabrowski, M. Kozłowski, E. Kowalska, E. Czerwosz, TEM and CL investigations of Pd nanograins included in carbonaceous film Solid State Phenomena 186, 177-181 (2012) (Electron Microscopy XIV)
- M. Godlewski, M.I. Łukasiewicz, E. Guziewicz, V.Y. Ivanov, L. Owczarczyk, **B.S. Witkowski**, Optical and magnetic properties of ZnCoO layers, Opt. Mat. 34 (12), 2045-2049 (2012)
- **B.S. Witkowski**, Ł. Wachnicki, P. Nowakowski, A. Suchocki, M. Godlewski, Temperature-dependence of cathodoluminescence of zinc oxide monolayers obtained by Atomic Layer Deposition, Optica Applicata 43 (1), 187 (2013)

- V.Y. Ivanov, A.J. Zakrzewski, **B.S. Witkowski**, M. Godlewski, Optical properties of ZnO doped with Cobalt ions, *Optical Materials* 59, 15-19 (2016)
- E. Guzewicz, E. Przezdziecka, D. Snigurenko, D. Jarosz, **B. S. Witkowski**, P. Dłuzewski, and W. Paszkowicz, Abundant Acceptor Emission from Nitrogen-Doped ZnO Films Prepared by Atomic Layer Deposition under Oxygen-Rich Conditions, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 9 (31), 26143-26150 (2017)
- E. Przezdziecka, E. Guzewicz, **B.S. Witkowski**, Photoluminescence investigation of the carrier recombination processes in N-doped and undoped ZnO ALD films grown at low temperature *Journal of Luminescence* 198, 68-76 (2018)

Poza charakteryzacją mikroskopową materiałów część mojej działalności naukowej dotyczy współpracy naukowej opartej na technologii wzrostu nanosłupków ZnO. Są m.in. prace związane z zastosowaniem nanosłupków w ogniwach fotowoltaicznych (inne prace, niż zaliczone do cyklu habilitacyjnego) i detektorach, m.in.:

- E. Placzek-Popko, K. Gwozdz, Z. Gumieny, E. Zielony, R. Pietruszka, **B. S. Witkowski**, Ł. Wachnicki, S. Gieraltowska, M. Godlewski, W. Jacak and Liann-Be Chang, Si/ZnO nanorods/Ag/AZO structures as promising photovoltaic plasmonic cells, *Journal of Applied Physics* 117, 193101 (2015)
- W. Jacak, E. Popko, A. Henrykowski, E. Zielony, K. Gwozdz, G. Luka, R. Pietruszka, **B. Witkowski**, Ł. Wachnicki, L.-B. Chang, M.-J. Jeng, On the size dependence and spatial range for the plasmon effect in photovoltaic efficiency enhancement, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 147, 1-16 (2016)
- P. Materska, **B.S. Witkowski**, M. Godlewski, Influence of Annealing on Optical Properties of ZnO Nanorods Obtained by the Microwave-Assisted Hydrothermal Process, *Acta Physica Polonica A* 130 (5), 1202-1204 (2016)
- K. Gwozdz, E. Placzek-Popko, E. Zielony, K.M. Paradowska, R. Pietruszka, **B.S. Witkowski**, K. Kopalko, M. Godlewski, Liann-be Chang, Deep traps in the ZnO nanorods/Si solar cells *Journal of Alloys and Compounds* 708, 247-254 (2017)
- S. Kimiagar, V. Najafi, **B. Witkowski**, R. Pietruszka, M. Godlewski, High performance and low temperature coal mine gas sensor activated by UV-irradiation, *Scientific Reports* 8 (1), 16298 (2018)
- S. Kimiagar, F. Abrinaei, **B. Witkowski**, R. Pietruszka, M. Godlewski, Nonlinear optical response of ZnO/HfO₂ core/shell nanorod arrays under continuous wave laser irradiation, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 30 (1), 797-805 (2019)

Ponadto brałem udział w wielu innych przedsięwzięciach naukowych. Jedną z najciekawszych była współpraca z grupą fizyki biologicznej kierowaną przez prof. Marka Cieplaka w Instytucie Fizyki PAN dotycząca bazy danych zawierającej wyniki symulacji rociągania białek. Współpraca ta była kontynuacją mojej pracy licencjackiej i doprowadziła do powstania publikacji *M. Sikora, J.I. Sułkowska, B.S. Witkowski, M. Cieplak, BSDB: the biomolecule stretching database, Nucl. Acid Res. 39, D443-D450 (2011)*, natomiast sama baza danych jest dostępna na stronie Instytutu Fizyki PAN (<http://jowisz.ifpan.edu.pl/BSDB/>).

Pełna lista publikacji naukowych znajduje się w załączniku nr 3.

Poza działalnością naukową skupiałem się również intensywnie na aspektach promocji nauki i budowy współpracy naukowej z przemysłem. Będąc jednym z pracowników Centrum Transferu Technologii Instytutu Fizyki PAN (miało to również związek z pełnioną funkcją w projekcie Eagle – szczegóły znajdują się w zał. 3) skupiałem się na aktywnościach związanych z uczestnictwem w targach innowacji oraz organizacją warsztatów mających na celu aktywizacji współpracy naukowo-przemysłowej.

5.2 Prezentacje na konferencjach, seminariach

Wygłosiłem 10 referatów zaproszonych:

1. **B.S. Witkowski, Ł. Wachnicki, S. Gierałtowska, M. Godlewski**
ZnO nanorods grown by the hydrothermal method
VI Sympozjum doktoranckie IF PAN, Mądralin, 16-17 maja 2014
2. **B.S. Witkowski, Ł. Wachnicki, S. Gierałtowska, R. Pietruszka, G. Łuka, P. Sybilski, M. Godlewski**
Nanostłupki ZnO o wysokiej jakości - technologia i zastosowania
XIII Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko Wschodnie, 9-13 czerwca 2014
3. **B.S. Witkowski, Ł. Wachnicki, S. Gierałtowska, R. Pietruszka, M. Godlewski**
High Quality ZnO Nanorods – From A New Technology To Applications
22'nd International Conference on Composites/Nanoengineering (ICCE-23)
Malta, St. Julian, 13-19 lipca 2014
4. **B.S. Witkowski, Ł. Wachnicki, S. Gierałtowska, R. Pietruszka, G. Łuka, P. Sybilski, E. Zielony, P. Bieganski, E. Popko, M. Godlewski**
High quality ZnO nanorods grown by an ultra fast hydrothermal process - technology and applications
EMRS Fall Meeting 2014, Warszawa, 15-20 września 2014
5. **B.S. Witkowski, Ł. Wachnicki, S. Gierałtowska, A. Pieniążek, A. Reszka, B.J. Kowalski, M. Godlewski**
Charakteryzacja nanostłupków ZnO wzrastanych z roztworu wodnego metodami skaningowej mikroskopii elektronowej
X Konferencja Techniki Próżni, Cedzyna k. Kielc, 22-25 września 2014

6. **B.S. Witkowski, L. Wachnicki, S. Gieraltowska, R. Pietruszka, P. Sybilski, M. Godlewski**
Zinc oxide nanorods: growth technology, characterization and applications
8th Symposium on Vacuum based Science and Technology, Kaiserlautern, Niemcy,
30 września - 2 października 2014
7. **B.S. Witkowski, S. Gieraltowska, Ł. Wachnicki, R. Pietruszka, P. Sybilski, M. Godlewski**
Charakteryzacja i zastosowania nanosłupków ZnO otrzymywanych metodą hydrotermalną
Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko Wschodnie, 8-12 czerwca 2015
8. **B.S. Witkowski, Rafał Pietruszka, Marek Godlewski**
Technologia wzrostu nanosłupków ZnO i ich zastosowanie w ogniwach fotowoltaicznych,
Krajowa Konferencja Elektroniki 2016, 6-10 czerwca 2016, Darłówko Wschodnie
9. **B.S. Witkowski, N. Cichocka, M. Ożga, R. Pietruszka, Ł. Owczarczyk, V.Yu. Ivanov, M. Godlewski**
Badania luminescencji nanosłupków ZnO otrzymywanych metodą hydrotermalną
wspomaganą mikrofalowo
XI Konferencja Techniki Próżni, Cedzyna k. Kielc, 25-28 września 2017
10. **B.S. Witkowski, M. Godlewski,**
Will our civilization survive?
Konferencja "Nauka przed wyzwaniami cywilizacyjnymi" zorganizowana jako wydarzenie
towarzyszące targom INTARG 2018, 20 czerwca 2018, Katowice

Ponadto wygłosiłem 7 referatów oraz przedstawiłem 23 prezentacje plakatowe na konferencjach naukowych. Ogólna liczba prezentacji konferencyjnych: ponad 140 (włączając współautorstwa prezentacji plakatowych i ustnych)

Dokładne dane znajdują się w załączniku nr 3.

Ponadto wygłaszałem wielokrotne seminaria wewnętrzne Instytutu Fizyki PAN, jak również wystąpienia w czasie panelów ekspertów oraz odbiorów projektów realizowanych w ramach POIG.

5.3 Działalność organizacyjna, edytorska i recenzencka

Współorganizowałem 8 międzynarodowych konferencji naukowych:

1. International Symposium on Growth of III-Nitrides ISGN-7, 5-10 sierpnia 2018, Warszawa - byłem odpowiedzialny za koordynację składania streszczeń prezentacji
2. 47th International School and Conference on the Physics of Semiconductors
"Jaszowiec 2018", Szczyrk, 16-22 czerwca 2018r. – Sekretarz naukowy, członek Komitetu Programowego i Komitetu Organizacyjnego
Następnie byłem gościnnym edytorem konferencyjnego wydania tomu
Acta Physica Polonica A 134 (4).

3. Konferencja „High-k oxides by ALD”, Wrocław, 7-10 marca 2018r. – Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego
4. 46th International School and Conference on the Physics of Semiconductors
„Jaszowiec 2017”, Szczyrk , 17-23 czerwca 2017r. – Sekretarz naukowy, członek Komitetu Programowego i Komitetu Organizacyjnego
Następnie byłem gościnnym edytorem konferencyjnego wydania tomu
Acta Physica Polonica A 132 (2).
5. 45th International School and Conference on the Physics of Semiconductors
„Jaszowiec 2016”, Szczyrk , 18-24 czerwca 2016r. – Sekretarz naukowy, członek Komitetu Programowego i Komitetu Organizacyjnego
Następnie byłem gościnnym edytorem konferencyjnego wydania tomu
Acta Physica Polonica A 130 (5).
6. 44th International School and Conference on the Physics of Semiconductors
„Jaszowiec 2015”, Wisła , 20-25 czerwca 2015r. – członek Komitetu Organizacyjnego
7. 43rd International School and Conference on the Physics of Semiconductors
„Jaszowiec 2014”, Wisła , 7-12 czerwca 2014r. – członek Komitetu Organizacyjnego
8. 42nd International School and Conference on the Physics of Semiconductors
„Jaszowiec 2013”, Wisła , 22-27 czerwca 2013r. – członek Komitetu Organizacyjnego

Ponadto byłem recenzentem prac dyplomowych wykonywanych na Wydziale Matematyczno-Przyrodniczym Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego oraz recenzentem artykułów dla czasopism naukowych. Dokładne dane znajdują się w załączniku nr 3.

5.4 Działalność dydaktyczna i popularyzatorska

Od 2017 roku jestem członkiem Zarządu Polskiego Towarzystwa Próżniowego.

Jestem/byłem promotorem pomocniczym w następujących przewodach doktorskich:

- Rafał Pietruszka, Instytut Fizyki PAN (obrona odbyła się: 2 czerwca 2016)
- Agnieszka Pieniążek, Instytut Fizyki PAN

Od 2014 roku prowadzę regularne zajęcia na Wydziale Matematyczno-Przyrodniczym Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie. Ponadto sprawowałem opiekę nad pracami dyplomowymi wykonywanymi na tym Wydziale (4 prace licencjackie oraz 3 prace magisterskie).

W latach 2012-2018 uczestniczyłem w różnego rodzaju targach innowacji i wystawach wynalazków (13 wyjazdów) promując osiągnięcia Instytutu Fizyki PAN (m.in. Brussels Innova).

Dokładne dane znajdują się w załączniku nr 3.

5.5 Udział w realizacji projektów naukowych

Kierowałem następującym projektem naukowym:

- Wyjaśnienie mechanizmów zmiany właściwości elektrycznych nanosłupków ZnO wytwarzanych metodą hydrotermalną pod wpływem światła z zakresu widzialnego i UV,
Nr projektu: UMO-2012/07/N/ST3/03144,
Źródło finansowania: Narodowe Centrum Nauki
Czas realizacji: 2013-2015
(projekt został rozliczony i pozytywnie oceniony przez NCN)

Byłem również zastępcą kierownika pakietu zadaniowego WP5 projektu:

- European Action towards Leading Centre for Innovative Materials – EAgLE
Nr projektu: FP7-REGPOT-2012-2013-1
Źródło finansowania: Projekt realizowany z funduszy Unii Europejskiej
Czas realizacji: 2014-2016

Dodatkowo byłem (lub wciąż jestem) wykonawcą w 20 projektach naukowo-badawczych i badawczo-rozwojowych. Dokładne dane znajdują się w załączniku nr 3.

5.6 Otrzymane nagrody, stypendia i wyróżnienia

Nagrody, wyróżnienia i stypendia:

1. Nagroda Naukowa Dyrektora Instytut Fizyki PAN za rok 2014 za przedstawienie wyróżniającej się rozprawy doktorskiej „Hydrotermalna technologia otrzymywania nanosłupków ZnO”
2. Stypendium Ministra dla wybitnego młodego naukowca na lata 2015-2018
3. Otrzymane stypendium w ramach projektu systemowego Samorządu Województwa Mazowieckiego pn. „Potencjał naukowy wsparciem dla gospodarki Mazowsza – stypendia dla doktorantów” w roku akademickim 2011/2012
4. Brązowy Laur Innowacyjności za zgłoszenie pt. "Komórki fotowoltaiczne oparte o nanosłupki i warstwy ZnO", którego jestem współautorem.
5. Wyróżnienie pracy doktorskiej w VI edycji konkursu "Innowator Mazowsza"
6. Nagroda za najlepszą pracę zaprezentowaną przez młodego naukowca, XIII Seminarium Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe „SemPiSC 2015”, 16-18 września 2015, Szklarska Poręba

7. Nagroda za najlepszą prezentację w sekcji technologii, XII Seminarium Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe SemPiSC, 9-12 maja 2012, Szklarska Poręba
8. Nagroda za najlepszą prezentację wygłoszoną przez młodego naukowca, konferencja EMRS Fall Meeting 2014, Symposium L, Warszawa, 15-19 września 2014
9. Nagroda za najlepszą prezentację wygłoszoną przez młodego naukowca, Krajowa Konferencja Elektroniki KKE 2014, Special session about transparent oxide semiconductors, Darłówko Wschodnie, 9-13 czerwca 2014
10. Nagroda za najlepszy plakat podczas IX Konferencja Techniki Próżni, Cedzyna koło Kielc, 6-8 czerwca 2011
11. Dyplom uznania Rektora Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie prof. dr. Hab. Wiesława Bielawskiego za osiągnięcia naukowe, 1 października 2018 (za wspólne publikacje naukowe)

Ponadto byłem współautorem rozwiązań i wynalazków, za które Instytut Fizyki PAN otrzymał 34 nagrody i medale na Targach Innowacji i Wystawach Wynalazków. Dokładne dane znajdują się w załączniku nr 3.

5.7 Budowa unikatowej aparatury badawczej

W 2014 r. we współpracy z firmą Ertec (producent reaktorów hydrotermalnych wspomaganych mikrofalowo) uczestniczyłem w opracowaniu nowego typu reaktora o zmodyfikowanej komorze, który umożliwił wzrost nanosłupków ZnO na podłożach o wymiarach $5 \times 5 \text{ cm}^2$ (uprzednio limit rozmiarów podłoża wynosił $1,5 \times 1,5 \text{ cm}^2$). Jest to jedyny prototyp tego typu reaktora.

W 2012 r. uczestniczyłem w budowie komory do pomiarów sensorowo-optycznych, która umożliwia monitorowanie właściwości elektrycznych w różnych otoczeniach gazowych oraz różnych temperaturach (do 300°C) z możliwością dostraczenia źródła światła poprzez okno kwarcowe. Wyniki otrzymywane za pomocą komory były wykorzystywane w publikacjach oraz zgłoszeniach targowych dotyczących detektora UV i sensorów gazów.

5.8 Patenty i zgłoszenia patentowe

Jestem współautorem 12 przyznanych patentów oraz 8 nowych zgłoszeń patentowych (w tym 4 zgłoszenia w urzędzie europejskim i 2 zgłoszenia w urzędzie patentowym w USA).

5.9 Referencje

1. C. Klingshirn, ZnO: From basics towards applications, *Phys. Status Solidi B* 244, 3027-3073 (2007)
2. Z.L. Wang, Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications, *J. Phys.: Condens. Matter* 16, R829–R858 (2004)
3. X.H. Kong, X.M. Sun, X.L. Li, Y.D. Li, Catalytic growth of ZnO nanotubes, *Mater. Chem. Phys.* 82, 997 (2003)
4. Z.X. Pan, Z.R. Dai, Z.L. Wang, Nanobelts of Semiconducting Oxides, *Science* 291, 1947 (2001)
5. M. S. Arnold, Ph. Avouris, Z. W. Pan, and Z. L. Wang, Field-Effect Transistors Based on Single Semiconducting Oxide Nanobelts, *J. Phys. Chem. B* 107, 659 (2003)
6. X.Y. Kong and Z.L. Wang, Spontaneous Polarization-Induced Nanohelices, Nanosprings, and Nanorings of Piezoelectric, Nanobelts, *Nano Lett.* 3, 1625-1631 (2003)
7. L. Vayssieres, Growth of Arrayed Nanorods and Nanowires of ZnO from Aqueous Solutions, *Adv. Mater.* 15(5), 464-466 (2003)
8. D. P. Norton, Y. W. Heo, M. P. Ivill, K. Ip, M. F. Pearton, S. J. Chisholm, and T. Steiner, ZnO: growth, doping & processing, *Materials Today* 7, 34-40 (2004)
9. Praca doktorska: Bartłomiej S. Witkowski, Hydrotermalna technologia otrzymywania nanosłupków ZnO, Instytut Fizyki PAN, 2013.
10. B.S. Witkowski, L. Wachnicki, S. Gieraltowska, P. Sybilski, M. Stachowicz, M. Godlewski UV detector based on zinc oxide nanorods obtained by the hydrothermal method *Phys. Status Solidi C* 11(9-10), 1447-1451 (2014)
11. Praca doktorska: Rafał Pietruszka, Otrzymywanie i charakteryzacja ogniw fotowoltaicznych zawierających cienkie warstwy oraz nanosłupki tlenku cynku, Instytut Fizyki PAN, 2016.
12. A. Vergés, A. Mifsud and C.J. Serna, Formation of rod-like zinc oxide microcrystals in homogeneous solutions, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, 86, 959-963 (1990)
13. L. Vayssieres, K. Kei and S.E. Lindquist, Purpose-Built Anisotropic Metal Oxide Material: 3D Highly Oriented Microrod Array of ZnO, *J. Phys. Chem. B* 105, 3350-3352 (2001)
14. S.M. Sze, K.K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed., Wiley, New York, 1981.
15. M. H. Huang, S. Mao, H. Feick, H. Yan, Y. Wu, H. Kind, E. Weber, R. Russo, P. Yang, Room-Temperature Ultraviolet Nanowire Nanolasers, *Science* 292, 1897-1899 (2001)
16. S. Chu, G. Wang, W. Zhou, Y. Lin, L. Chernyak, J. Zhao, J. Kong, L. Li, J. Ren, J. Liu, Electrically pumped waveguide lasing from ZnO nanowires, *Nature Nanotechnology* 6, 506–510 (2011)
17. B. K. Meyer, H. Alves, D. M. Hofmann, W. Kriegseis, D. Forster, F. Bertram, J. Christen, A. Hoffmann, M. Straßburg, M. Dworak, U. Haboeck and A. V. Rodina, Bound exciton and donor–acceptor pair recombinations in ZnO, *Phys. Stat. Sol. (b)* 241 (2), 231– 260 (2004)
18. R.H. Dicke, Coherence in spontaneous radiation processes, *Phys Rev* 93, 99–110 (1954)
19. M. Scheibner, T. Schmidt, L. Worschech, A. Forchel, G. Bacher, T. Passow, D. Hommel, Superradiance of quantum dots, *Nature Physics* 3, 106–110 (2007)
20. LI Q., XU S.J., XIE M.H., TONG S.Y., Origin of the ‘S-shaped’ temperature dependence of luminescent peaks from semiconductors, *Journal of Physics: Condensed Matter* 17(30), 4853–4858 (2005)
21. B.S. Witkowski, Ł. Wachnicki, P. Nowakowski, A. Suchocki, M. Godlewski, Temperature-dependence of cathodoluminescence of zinc oxide monolayers obtained by Atomic Layer Deposition, *Optica Applicata* 43 (1), 187-194 (2013)
22. M.-C. Jeong, B.-Y. Oh, M.-H. Ham, J.-M. Myoung, Electroluminescence from ZnO nanowires in n-ZnO film/ZnO nanowire array/p-GaN film heterojunction light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.* 88, 202105 (2006)
23. S. J. An, J. H. Chae, G.-C. Yi, G. H. Park, Enhanced light output of GaN-based light-emitting diodes with ZnO nanorod arrays, *Appl. Phys. Lett.* 92, 121108 (2008)
24. W.J. Li, E.W. Shi, W.Z. Zhong, Z.W. Yin, Growth mechanism and growth habit of oxide crystals, *J. Cryst. Growth* 203, 186-196 (1999)
25. R. Chen, B. Ling, X. W. Sun, H. D. Sun, Room Temperature Excitonic Whispering Gallery Mode Lasing from High-Quality Hexagonal ZnO Microdisks, *Advanced Materials* 23 (19), 2199-2204 (2011)
26. D. J. Gargas, M. C. Moore, A. Ni, S.-W. Chang, Z. Zhang, S.-L. Chuang, P. Yang, Whispering Gallery Mode Lasing from Zinc Oxide Hexagonal Nanodisks, *ACS Nano* 4 (6), 3270–3276 (2010)
27. C. Czekalla, T. Nobis, A. Rahm, B. Cao, J. Zuniga-Perez, C. Sturm, R. Schmidt-Grund, M. Lorenz, M. Grundmann, Whispering gallery modes in zinc oxide micro- and nanowires, *Physica Status Solidi B* 247 (6), 1282-1293 (2010)

28. J. Wallentin, N. Anttu, D. Asoli, M. Huffman, I. Aberg, M. H. Magnusson, G. Siefer, P. Fuss-Kailuweit, F. Dimroth, B. Witzigmann, H. Q. Xu, L. Samuelson, K. Deppert, M. T. Borgstrom, InP Nanowire Array Solar Cells Achieving 13.8% Efficiency by Exceeding the Ray Optics Limit, *Science* 17, 1230969 (2013)
29. R. Pietruszka, G. Luka, B.S. Witkowski, K. Kopalko, E. Zielony, P. Bieganski, E. Placzek-Popko, M. Godlewski, Electrical and photovoltaic properties of ZnO/Si heterostructures with ZnO films grown by atomic layer deposition, *Thin Solid Films* 563, 28-31 (2014)
30. R. Pietruszka, R. Schifano, T.A. Krajewski, B.S. Witkowski, K. Kopalko, Ł. Wachnicki, E. Zielony, K. Gwozdz, P. Bieganski, E. Placzek-Popko, M. Godlewski, Improved efficiency of n-ZnO/p-Si based photovoltaic cells by band offset engineering, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 147, 164-170 (2016)

Bartłomiej Witkowski

