

Warszawa, 11.09.2023 r.

dr hab. Michał A. Borysiewicz
Sieć Badawcza Łukasiewicz
- Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki
Al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Moniki Oźgi
p.t. „Warstwy tlenku miedzi (II) otrzymywane metodą hydrotermalną – technologia wzrostu,
charakteryzacja oraz potencjalne zastosowania w elektronice”

Recenzowana praca poświęcona jest doświadczalnym badaniom możliwości wytwarzania cienkich warstw tlenku miedzi (II), CuO, na podłożach wykonanych z materiałów krystalicznych i amorficznych na drodze procesów hydrotermalnych, jak również późniejszej weryfikacji przydatności opracowanego materiału dla zastosowań w przyrządach rezystancyjnej pamięci o dostępie swobodnym, RRAM. Tematyka wytwarzania materiałów tlenkowych jak również ich zastosowań elektronicznych cieszy się nieustannie zainteresowaniem od wielu lat. Obszar ten jest zdominowany przez badania tlenku cynku, w szczególności jego rozmaitych form nanostrukturalnych oraz struktur warstwowych jak również tlenku indowo-cynkowo-galowego i przyrządów na nim opartych, jednakże tlenek miedzi jest również intensywnie badany, w szczególności w zastosowaniach fotowoltaicznych, sensorowych, magazynach energii czy zastosowaniach RRAM, do czego nawiązuje niniejsza rozprawa. Technologie oparte na tlenku miedzi nie są jednak jeszcze na wysokim poziomie dojrzałości w odniesieniu do wymagań stawianych wobec materiałów dla elektroniki w ogólności, czy w szczególności np. do technologii tranzystorów polowych na bazie tlenku indowo-cynkowo-galowego, co stwarza korzystne warunki do prowadzenia badań w tej

tematyce. Należy zauważyć, że zwłaszcza wytwarzanie cienkich warstw CuO na drodze technik innych niż próżniowe czy chemicznego osadzania par, jest w literaturze opanowane na niezadowalającym poziomie i na tym tle przedłożona rozprawa wyróżnia się pozytywnie.

Cel rozprawy został zdefiniowany przez Autorkę za pomocą trzech celów charakterystycznych: technologicznego, badawczego i aplikacyjnego. Są nimi kolejno: opracowanie technologii wzrostu cienkich warstw CuO, określenie właściwości fizycznych wytwarzanego materiału oraz próba demonstracji cienkowarstwowej struktury pamięciowej. Uważam, że takie rozbieżności celów dobrze oddaje charakter prowadzonych prac, które dotyczą zarówno pokonywania problemów technologicznych, jak i badania zjawisk fizycznych w kontekście konkretnego zastosowania w strukturach dla przyrządów pamięciowych o dostępie swobodnym (RRAM).

Praca realizowana była w Zespole fizyki struktur tlenkowych ON 2.4 Instytutu Fizyki PAN w Warszawie, oraz w Instytucie Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej. Obie grupy posiadają wszelkie kompetencje naukowe i techniczne, jak również najwyższej klasy zaplecze sprzętowe niezbędne do przeprowadzenia zaplanowanych badań.

Rozprawa obejmuje 137 stron i jest podzielona na 11 rozdziałów. Wyniki własne Autorki przedstawiono w rozdziałach od 5. do 10., a rozdział 11. zawiera podsumowanie, po którym następuje wykaz dorobku naukowego oraz wykorzystanej bibliografii.

Rozdziały 1-4 obejmują wprowadzenie, właściwości tlenku miedzi (II), cechy memrystorów, a także opis wykorzystanej aparatury i technik eksperymentalnych. Części te wprowadzają we własności tlenku miedzi (II), w niektóre zjawiska fizyczne związane z działaniem memrystorów, omawiają istniejący stan wiedzy, a także wyczerpująco opisują występujące w literaturze technologie wytwarzania cienkich warstw CuO. Materiał został prawidłowo dobrany pod kątem merytorycznym, jednakże opisy zjawisk oraz technik mogłyby być przedstawione w innej kolejności oraz w bardziej dogłębny sposób. Przykładowo, w rozdziale 3.1. występuje opis struktury warstwowej komórki RRAM, która pod wpływem przyłożonego napięcia „może przełączać się między stanami wysokiej rezystancji (HRS) lub niskiej rezystancji (LRS)”. Po takim stwierdzeniu czytelnik z zainteresowaniem poznałby fizyczny mechanizm przełączania, sposób w jaki powstają i są zrywane ścieżki przewodzące oraz ewentualne modele wyjaśniające transport w materiale. W tym miejscu jednakże podrozdział się kończy i następuje sekcja 3.2 obejmująca historyczne omówienie rozwoju koncepcji i implementacji memrystora jako przyrządu w którym możliwe jest przełączanie między

stanami LRS i HRS, bez szczegółów fizycznych. Poszukiwane informacje zostały jednak ujęte w pracy, ale dopiero w rozdziale 9 próbującym omówić mechanizm przełączana rezystancyjnego w wytworzonych próbkach. Wydaje się, że dla logiki wyводу korzystniejszym byłoby zawrzeć je we wprowadzeniu. Kolejność następujących rozdziałów, 4 i 5 wywołała u mnie lekką konfuzję. Wydawać by się mogło, że skoro praca dotyczy przede wszystkim wytwarzania materiałów, to pierwszą omawianą techniką eksperymentalną powinna być technika syntezy hydrotermalnej (rozdział 5) a dopiero po niej opis technik charakterystycznych (rozdział 4). Uważam, że praca zyskałaby na czytelności przy takim układzie rozdziałów. Zabrakło mi również omówienia samej metody hydrotermalnej. Autorka odwołuje się do swoich wcześniejszych doświadczeń dotyczących realizacji prac związanych ze wzrostem nanosłupków ZnO, na podstawie których wykonała modyfikację metody hydrotermalnej, jednakże nie opisuje w jasny sposób stanu przed i po modyfikacji. Jest to szczególnie istotne ze względu na twierdzenie Autorki o uwolnieniu się od wielu problemów występujących w konwencjonalnej technice hydrotermalnej po wprowadzeniu modyfikacji. Problemy te jednak nie są zdefiniowane, a modyfikacja techniki nie jest dokładnie opisana. Jedynym zdaniem wspomina się o zastąpieniu grzania mikrofalowego roztworu grzaniem indukcyjnym, jednak wpływ tej zamiany jak również być może modyfikacja innych czynników na przebieg i wynik reakcji nie jest w ogóle omówiona, a przedstawiony schemat procesu jest dość konwencjonalny dla metody hydrotermalnej. Uważam, że Doktorantka powinna była poświęcić na to kilka akapitów wyjaśnień zwłaszcza, że zastosowane podejście wyróżnia się o rzędy wielkości krótszym czasem syntezy od podejść opisywanych w literaturze oraz wysoką jednorodnością otrzymanych warstw. Bez tego trudno docenić wysiłek włożony w modyfikację metody hydrotermalnej, która przecież pozwoliła osiągnąć bardzo dobrej jakości warstwy i stała się przedmiotem patentu. W tym miejscu muszę również wspomnieć o brakach w rozdziale 4. dotyczących opisu technologii. W rozprawie doktorskiej Autorka powinna była zamieścić podstawowy opis zjawisk fizycznych i schematy użytych technologii. Zastosowane opisy, z wyjątkiem opisów pomiarów mikroskopią sił z sondą Kelwina, są enigmatyczne i nie omawiają zjawisk fizycznych a raczej techniczne kwestie obróbki danych. Zastępowanie szczegółów odnośnikami literaturowymi uważam za będące nie na miejscu w rozprawie doktorskiej. Opis technologii również pozwala recenzentom ocenić stopień zrozumienia technologii przez autora bądź autorkę rozprawy doktorskiej i nie należy z tego rezygnować w imię krótkiej formy.

Rozdział 5 poza naszkicowaniem schematu reakcji zawiera opis procedur zarodkowania oraz proponowany mechanizm wzrostu oraz wpływ parametrów reakcji na otrzymane warstwy. W tym momencie należy podkreślić, że otrzymano warstwy polikrystaliczne, lite, zwarte o dość jednorodnej grubości, co jest niewątpliwym osiągnięciem Doktorantki. Na tle literatury materiały te wyróżniają się zdecydowanie pozytywnie spójnością strukturalną i umożliwiają podjęcie prac nad zastosowaniami w elektronice, a zbadanie wpływu metalicznej warstwy zarodkującej na wzrost CuO może służyć np. do strukturyzacji wytwarzanych warstw.

Nie mogę jednak przeoczyć błędnego moim zdaniem wyjaśnienia mechanizmu wzrostu CuO. W ogólności w reakcjach hydrotermalnych mechanizm ten jest dość prosty. Sól zawierającą kation miedziany rozpuszcza się w wodzie, intensywnie mieszając w celu uzyskania jednorodnego roztworu. Dodając zasadowy czynnik strącający otrzymuje się wodorotlenek miedzi (II) oraz sól kationu zasady z pierwotnym anionem soli miedzi. Podgrzewając tę mieszaninę doprowadza się do kalcynacji wodorotlenku miedzi (II) do tlenku miedzi (II), który odzyskuje się przez filtrację i płukanie. Zgodnie z przytoczonym w rozprawie diagramem dysocjacji jonów miedzi (II) reakcja ta zachodzi w obszarze współobecności roztworzonych jonów miedzi Cu^{2+} oraz stałej formy CuO, czyli w pH od 5.5 do 8.5, co jest zbieżne z obserwacją Doktorantki, mówiącą że tylko w tym zakresie pH obserwowano wzrost warstw CuO. Doktorantka jednakże próbuje tłumaczyć reakcję poprzez kluczową Jej zdaniem obecność jonów CuOH^+ , które są jedynie pośrednią formą w takiej reakcji na drodze od Cu^{2+} poprzez CuOH^+ do $\text{Cu}(\text{OH})_2$ i wreszcie w skutek podgrzania do CuO. Nie rozumiem zupełnego pominięcia etapu zawierającego $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Jon CuOH^+ jest tylko jednym z możliwych koordynacyjnie jonów wodorotlenku miedzi, a jego obecność również powinna mieć miejsce również w silnie kwasowych pH, w których to wzrostu warstw nie zaobserwowano. Mój sprzeciw wzbudza również stwierdzenie ze strony 37 o tym, że pH nie zmienia się podczas procesu. Czy Doktorantka to zmierzyła? Wystarczyłoby co kilka sekund (np. w korelacji z czasami podanymi przy kolejnych zdjęciach mieszaniny reakcyjnej na Rys. 11) dokonywać pomiaru pH. Wodorotlenek miedzi który tworzy się jako produkt pośredni przed kalcynacją do CuO ma odczyn zasadowy, co wraz z konsumpcją kwasowych jonów Cu^{2+} w trakcie reakcji przesuwają odczyn roztworu w kierunku wyższych pH w miarę postępowania reakcji. To tłumaczy również zatrzymywanie wzrostu po upływie pewnego czasu, jak to opisano w sekcji 5.4. Sam przebieg reakcji nie stanowi zatem zaskoczenia, analogicznie jak obserwacja wzrostu warstw o wysokiej zawartości na warstwie zarodkowej ze złota oraz wzrostu bardziej chropowatych warstw na warstwie zarodkowej z miedzi. Złoto jest powszechnie wykorzystywane jako materiał umożliwiający adsorpcję wielu cząsteczek z

roztworów, dzięki wspomnianemu w rozprawie gęstemu pokryciu grupami OH, co przekłada się na wysoką gęstość zarodkowania krystalitów i bardziej kolumnowy charakter wzrostu warstwy.

Rozdział 6 omawia własności fizyczne warstw otrzymanych po pojedynczym procesie wzrostu. Przeprowadzono pomiary składu fazowego warstw na drodze dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), obrazowanie powierzchni warstw skaningową mikroskopią elektronową (SEM) wraz z analizą rozmiarów krystalitów w programie ImageJ, jednakże bez podania metodyki tej analizy, analizę rozmiarów krystalitów z map mikroskopii sił atomowych (AFM) oraz innych parametrów wyznaczanych z map AFM, które pozwoliły opisać powierzchnię warstwy, wyznaczenie przerwy energetycznej materiału na drodze pomiaru transmisji optycznej, pomiary odpowiedzi próbek w konfiguracji Hallowskiej, pomiaru rozkładu ładunków elektrycznych za pomocą skaningowej mikroskopii pojemnościowej, oraz pomiaru zależności rezystancji i prądu w funkcji temperatury. Nie zaobserwowano obecności innych niż CuO faz krystalicznych, a szerokość przerwy energetycznej wyznaczona na 1.78-1.87 eV mieści się w zakresie oczekiwanych dla tego materiału, co jest pozytywne i świadczy o osiągnięciu jednego z celów rozprawy. Nie najlepiej jednak wygląda prezentowanie danych przykładowych - dla jednej, arbitralnie wybranej i nieopisanej próbki - i omawianie na ich przykładzie własności, np. w przypadku prób pomiaru efektu Halla. Analogicznie, brakuje mi tabel z własnościami liczbowymi tak istotnych parametrów dla zastosowań w elektronice jak rezystancja warstwy i pokazanie jej zmienności, bądź stabilności w funkcji parametrów procesu reakcji. Nie sądzę, aby przy stosowaniu różnych parametrów otrzymywano zawsze takie same, w 100% czyste i niedomieszkowane nieintencjonalnie CuO, a Autorka zdaje się rzutować wszystkie wyniki na jedną uogólnioną próbkę, która ma stanowić przedstawiciela próbek otrzymanych w danej metodzie o jednak znacznych różnicach w chropowatości powierzchni czy grubości. Ciekawymi wynikami są próby pomiaru efektu Halla, udaremnione przez zmieniające się znaki przewodnictwa. Szkoda, że Autorka nie przedstawiła otrzymanych charakterystyk z pomiaru efektu Halla i nie przeprowadziła ich samodzielnej analizy - układ firmy phystech stosujący automatyczne dopasowanie i wyznaczanie własności transportowych znany jest z dużych błędów w analizie, zwłaszcza dla próbek o wysokich rezystywnościach. Jednakże sprawdzenie próbek na innych układach odbieram pozytywnie, pod warunkiem że one również nie były automatyczne. W analizie pomiarów efektu Halla zabrakło mi jeszcze

zbadała własności samej warstwy zarodkującej - być może ona wytwarza równoległy kanał przewodnictwa metalicznego, który zaburza wyniki otrzymywane dla warstw?

Istotnym omówionym aspektem jest fakt niestabilności temperaturowej warstw, powszechny w przypadku materiałów wytwarzanych technikami mokrymi. Ze względu na pozostałości rozpuszczalnika, bądź lotnych zanieczyszczeń organicznych z towarzyszących produktów reakcji na granicach ziaren, bądź w porach między ziarnami, możliwe jest pęknięcie warstw po ich podgrzaniu powyżej temperatury wrzenia tych substancji. Ciekawe, czy występowała korelacja gęstości pęknięć z mocą grzania podczas reakcji bądź z pH roztworu, a tym samym np. z naprężeniami wyznaczonymi z pomiarów XRD. Szkoda, że nie przeprowadzono pomiarów skaningowej kalorymetrii różnicowej, która mogłaby uwidocznić temperatury zmian oraz potencjalnie pomóc w identyfikacji frakcji lotnych, jeśli takie faktycznie występowały.

Rozdział 7 omawia przyjęte podejście, które miało zaradzić powstawaniu nieciągłości w pękających warstwach i tym samym zapewnić dość gładką powierzchnię warstw. Zastosowano w tym celu sekwencje wzrostu warstwy, płukania jej i wygrzewania. Autorka najpierw przeprowadza wybór odpowiedniego gazu formującego dla wygrzewania oraz temperatury czasu, grubości warstw i liczby powtórzeń cykli. Na podstawie analizy dyfraktogramów próbek wygrzewanych w tlenie, argonie i azocie stwierdza, że jedynie wygrzewanie w czystym tlenie nie prowadzi do powstania faz innych niż CuO. Następnie analizuje próbki wygrzewane w powietrzu, które również nie wykazały obcych faz i przyjmuje w związku z tym obróbkę termiczną w mieszaninie tlenu z azotem w stosunku 1:1. Jest to niezrozumiałe, gdyż ten skład jest bardzo daleki od składu powietrza gdzie jest to mniej więcej 1:4. W dalszych krokach Doktorantka omawia określenie optymalnej temperatury poprzez obserwację morfologii warstw i stwierdza, że najlepszym oknem procesowym jest zakres 350°C do 550°C. Wynik ten koreluje się z wyznaczeniem składu chemicznego CuO na drodze spektroskopii rentgenowskiej z dyspersją energii, gdzie dla wyznaczonych temperatur skład chemiczny zmienia się w podobny sposób. Szkoda, że nie przeprowadzono analiz zależności rezystancji warstw od stosunku liczby atomów Cu do liczby atomów O. Na podstawie obserwacji spadku zawartości procentowej atomów węgla w próbce wyznaczonej tą techniką w funkcji liczby powtórzeń sekwencji, Autorka wnioskuje o zawartości substancji organicznych, jak rozumiem pochodzących z roztworu wykorzystywanego do wytworzenia warstw. Należałoby tę hipotezę uprawdopodobnić bardziej rygorystyczną analizą możliwych źródeł węgla w próbkach. Węgiel może pochodzić

również z zanieczyszczeń atmosferycznych, a jego wyższy, bądź niższy sygnał może być wynikiem po prostu bardziej, lub mniej rozwiniętej powierzchni próbki. Cieszy późniejsze poddanie próbek analizie ramanowskiej na Politechnice Wrocławskiej i wykazanie jedynie sygnałów od podłoża, bądź tlenku miedzi (II). Czy jednak w takim przypadku nie powinny być również widoczne jakieś sygnały od zanieczyszczeń organicznych, przynajmniej w próbkach niesekwencjonowanych, których nawet śladowe ilości mogą być wykrywane za pomocą spektroskopii ramanowskiej? Wydaje się, że można było tę możliwość rozważyć. Czytelnik pracy nie otrzymał do wglądu widm Ramana, więc sam nie może wyciągnąć na ten temat wniosków.

Ważnym wynikiem jest zastosowanie skaningowej mikroskopii pojemnościowej do udowodnienia dziurowego charakteru przewodnictwa wytworzonych warstw jak również do ukazania jego jednorodnego rozkładu przestrzennego. Analiza wyników jest jednakże obciążona bardzo dużą liczbą hipotez i bardziej omawia możliwości niż stan faktyczny. Podobnie dzieje się w przypadku pomiarów pojemnościowo-napięciowych, ponownie zabrakło podsumowania konkretnych danych użytecznych z punktu widzenia zastosowań elektronicznych w funkcji parametrów procesu wytwarzania. W całym rozdziale 7 obserwuję bardzo silny nacisk Autorki na otrzymanie jak najlepszych makrostrukturalnie warstw, co jest pożądane, jednakże wydaje się, że przy tak silnym skupieniu na tych własnościach, stracono z oczu równie ważne własności elektryczne i transportowe.

Rozdział 8 i rozdział 10 stanowią razem jeden z jaśniejszych punktów tej pracy, ponieważ pokazują obserwację oraz jej implementację w układach zarówno przyrządowym jak i mikroskalowym zjawiska przełączania rezystywności warstw pod wpływem polaryzacji elektrycznej, co jest równoznaczne z osiągnięciem jednego z celów rozprawy. Analiza sygnałów przeprowadzona dla różnych stałych czasowych wskazuje na szybką i trwałą zmianę rezystancji obserwowaną dla warstw o różnej strukturze sekwencyjnej. Bardzo ładny wynik zaobserwowano dla przełączania za pomocą mikroskopii sondą skanującą. Pomiary retencji i ich prognozowanie przez ekstrapolację pokazują potencjalnie możliwości zastosowania tych rozwiązań.

Rozdział 9 podejmuje się problematyki opisanie mechanizmu przełączania rezystancyjnego, niestety w obliczu wielu możliwych mechanizmów występujących potencjalnie w próbce nie sprostał temu zadaniu. Omówienie mechanizmów przełączania jest bardzo ogólnikowe i polega na dopasowaniu wielu prostych do wykresów prądowo-napięciowych ujętych w

różnych współrzędnych, co prowadzi do powstanie takich kuriozalnych wyników jak te przedstawione na rys. 55. Warto zauważyć, że dowolną krzywą można przybliżyć odpowiednio dużą liczbą prostych, co niekoniecznie musi odpowiadać rzeczywistości fizycznej. Oczywiście, w materiale może występować wiele różnych równoległych mechanizmów przewodnictwa, jednakże podanie takiego wyniku wskazuje na nieodpowiedni dobór technik eksperymentalnych do zadania. Skoro techniki nie pozwoliły na identyfikację, należało je zmienić. Co więcej, bardzo duża część opisu oparta jest na hipotezach i słabo umocowanych założeniach. Przykładowo, na stronie 98 napisano, że „emisja Schottky’ego została pominięta w przedstawionych rozważaniach, ponieważ mechanizm ten występuje przede wszystkim w wysokich temperaturach. W związku z niską temperaturą działania urządzenia założono, że model ten nie występuje, lub odgrywa nieznaczną rolę.”, pomijając zupełnie analizę możliwego układu pasm energetycznych i wysokości występujących barier, które mogą się okazać niższe od energii termicznej dla temperatury pokojowej.

Cieszy informacja podana na koniec rozdziału, że Autorka zidentyfikowała kroki konieczne do identyfikacji mechanizmów przewodnictwa i zaplanowała je w kierowanym przez siebie projekcie, jednakże z punktu widzenia oceny rozprawy doktorskiej prace planowane wykraczające poza rozprawę nie mają znaczenia.

Postawione na początku rozprawy cele zostały w większości zrealizowane. W mojej ocenie największymi osiągnięciami mgr Ożgi są:

1. opracowanie technologii wzrostu zwartych warstw tlenku miedzi (II) na drodze reakcji hydrotermalnej, bez widocznych porowatości i nieciągłości, różniący się od większości doniesień literaturowych
2. zademonstrowanie efektu przełączania stanu rezystancji struktury opartej na opracowanych warstwach pod wpływem polaryzacji elektrycznej. Odnoszę wrażenie, że mgr Ożga biegle opanowała techniki mikroskopii sondy skanującej.

Rozprawa nie jest jednakże pozbawiona wad. Oprócz wymienionych w akapitach powyżej najbardziej charakterystyczna jest niewystarczająca moim zdaniem staranność analizy i prezentacji wyników. Przejawia się to zarówno w niekomentowaniu takich zjawisk, jak np. występowanie stanów wysokiego i niskiego oporu w innej kolejności przemiatania charakterystyk prądowo-napięciowych w próbkach z pojedynczym sekwencjonowaniem i w próbkach przygotowanych z dwukrotnym sekwencjonowaniem (s. 80-81); braku komentarza do wyboru napięcia polaryzacji i depolaryzacji na $\pm 8V$ podczas, gdy wcześniejsze przebiegi

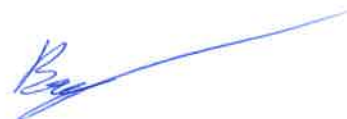
były mierzone w zakresach od około -3V do około +3V (s. 102); braku omówienia bądź przeprowadzenia testów wytrzymałości przełączania komórek RRAM (s. 103); całkowitego braku analizy ilościowej sposobu wpływu parametrów procesowych na rezystancję warstw CuO (rozdziały 6-7); nieprzygotowania próbek o jednakowej grubości do analizy XRD (Rys. 23) tak, aby móc je efektywnie porównać; czy braku pomiarów charakterystyk I-V w funkcji temperatury, gdy zidentyfikowano taką konieczność w celu wyjaśnienia mechanizmów przełączania (rozdział 9).

Układ graficzny rozprawy jest bardzo dobry, widać że Autorka konsekwentnie opracowała wykresy i grafiki w jednolitej niebiesko-czarnej kolorystyce. Czcionka jest czytelna, grafiki w znakomitej większości również.

Język rozprawy doktorskiej jest poprawny, chociaż występują w nim liczne kolokwializmy, typu „wzrastana warstwa”, „p-typu”, „n-typu”, „piki”, czy „warstwa as-grown” oraz potoczny sposób prowadzenia narracji. Czytając rozprawę ma się wrażenie uczestniczenia w dyskusji przy kawie, a nie w lekturze formalnego tekstu naukowego. Wydaje się, że większość tego typu błędów można było poprawić podczas szczegółowej redakcji pracy, zwłaszcza że przygotowanie własnej rozprawy doktorskiej stanowi dla wielu ostatni kontakt z pisanym formalnym językiem polskim w dużej skali i warto, aby ten język stał na wysokim poziomie dla kształtowania przyszłych pokoleń.

Mgr Oźga jest współautorką 12 publikacji naukowych w czasopismach z tzw. „listy filadelfijskiej”, co pokazuje dużą aktywność doktorantki. Z tych publikacji dwie dotyczą bezpośrednio wyników opisanych w rozprawie, ale jedynie w jednej z nich jest pierwszym autorem, co jest wynikiem przyzwoitym. Jest również współautorem trzech zgłoszeń patentowych dotyczących technologii wytwarzania warstw i przyrządów zawierających CuO oraz wzoru użytkowego, co stanowi bardzo dobry wynik pracy doktorskiej. Doktorantka wygłosiła 10 prezentacji ustnych, w tym dwa referaty zaproszone na Krajowej Konferencji Elektroniki, a także jest współautorką 5 prezentacji plakatowych oraz pierwszą autorką 2 seminariów. Otrzymała wyróżnienia za prezentacje oraz jest współlaureatką licznych złotych medali na międzynarodowych targach. Otrzymała również stypendium dyrektora IF PAN dla wyróżniających się doktorantów na rok 2021/2022. Jest kierowniczką projektu NCN Preludium oraz była wykonawczynią w 2 projektach Techmatstrateg i jednym POIR. Aktywność doktorantki należy wobec tego ocenić bardzo wysoko.

Mimo wspomnianych uchybień, stwierdzam że ze względu na otrzymane wyniki rozwiązujące określony problem naukowy jak i ich potencjał do zastosowania w gospodarce, rozprawa doktorska mgr Moniki Oźgi spełnia ustawowe warunki stawiane pracom na stopień doktora, zgodnie z art. 187 Prawa o szkolnictwie wyższym i nauce, i składam wniosek o dopuszczenie mgr Moniki Oźgi do publicznej obrony pracy doktorskiej.



dr hab. Michał A. Borysiewicz