



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

Wrocław, 19 grudnia 2025 r.

Prof. Robert Kudrawiec
Katedra Inżynierii Materiałów Półprzewodnikowych
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska
ul. Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27,
50-370 Wrocław
Tel.: +48 723 645 481, Fax: +48 71 328 36 96
e-mail: robert.kudrawiec@pwr.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra Jakuba Zdziebłowskiego
z tytułu pracy „Application of Chalcogenides Semiconductors in Artificial
Neuromorphic Devices” wykonanej pod opieką dr hab. Pawła Zabierowskiego na
Politechnice Warszawskiej**

Praca doktorska Pana mgra Jakuba Zdziebłowskiego jest pracą eksperymentalną z fizyki ciała stałego, a dokładnie fizyki przyrządów półprzewodnikowych i napisana jest po angielsku. Jej przedmiotem jest potencjalne wykorzystanie siarczku kadmowo-indowego (CdIn_2S_4) w memrystorach, tj. elementach półprzewodnikowych, których rezystancja zależy od ładunku, który przepłynął przez taki memrystor. Od momentu pierwszej fizycznej realizacji takiego memrystora opublikowanej przez D. Stukow i pozostali w 2008 roku (Nature 453, 80-83 (2008) - praca cytowana ponad 13 tys. razy) poszukiwanie układów materiałowych, które są w stanie zrealizować taki memrystor cieszy się bardzo dużym zainteresowaniem. CdIn_2S_4 to związek półprzewodnikowy, który był bardzo intensywnie badany dekady temu pod kątem zastosowań w fotowoltaice, a ostatnio w fotokatalizie. Wraz z materiałami CIGS (ang. Copper Indium Gallium and Selenide) przez lata badany był na Politechnice Warszawskiej pod kątem zastosowań w fotowoltaice. Jedną z dobrze znanych cech tego materiału jest metastabilny charakter defektów punktowych, ale jak dotąd ta cecha tego materiału nie była badana pod kątem wykorzystania tego materiału w memrystorach. Podsumowując wybór tematyki, jej znaczenie, miejsce i czas realizacji uważam, że jest to bardzo aktualne zagadnienie w głównym nurcie badań nad nowymi elementami półprzewodnikowymi.

Recenzowana rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów i podsumowania, z czego rozdziały 5-8 przedstawiają oryginalne wyniki uzyskane przez doktoranta, a rozdziały 1-4 wprowadzają czytelnika do tematyki dysertacji i obejmują: rozdział 1 – opisuje motywację wraz ze sformułowaniem celu pracy, a w tym nawiązanie do rozwoju neuromorficznych systemów obliczeniowych oraz porównanie memrystorów do synaps;



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Account
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



rozdział 2 – przedstawia koncepcję neuromorficznych przyrządów półprzewodnikowych, a w tym koncepcję memrystora zaczynając od prac L. Chua z 1971 roku (L. Chua, „Memristor-the missing circuit element”, *IEEE Transactions on Circuit Theory* 18, 507-519 (1971)) gdzie memrystor został po raz pierwszy zaproponowany teoretycznie, poprzez prace gdzie memrystir został po raz pierwszy zademonstrowany fizycznie oraz prace, które podważają koncept teoretyczny memrystora;

rozdział 3 – opisuje metastabilne defekty oraz metody ich badania, a w tym metody badania neuromorficznego zachowania elementów półprzewodnikowych oraz koncepcję testu zachowania idealnego memrystora;

rozdział 4 – podsumowuje dotychczasową wiedzę na temat CdIn_2S_4 ;

Podsumowując te cztery rozdziały wprowadzające czytelnika w tematykę dysertacji uważam, że czyta się je bardzo dobrze mimo tego, że jest to bardzo obszerny opis na ponad 100 stron! W odpowiednich miejscach doktorant odsyła czytelnika do odpowiedniej literatury, a jej dobór jest właściwy i świadczy o bardzo dobrej znajomości literatury przedmiotu. Nie dostrzegam w tym opisie błędów merytorycznych i uważam, że w tej części rozprawy doktorant jednoznacznie dowiódł, że posiada ogólną wiedzę teoretyczną w tej tematyce oraz dyscyplinie nauki fizyczne, która jest wymagana do uzyskania stopnia doktora.

Odnosząc się do zawartości rozprawy opisanej w rozdziałach 3-5 uważam, że doktorant uzyskał oryginalne i bardzo interesujące wyniki, które stanowią istotny wkład do literatury przedmiotu i które zostały bardzo dobrze opublikowane (J. Zdziebłowski, N. Barreau, and P. Zabierowski, „Interface Barrier-Modulated Neuromorphic Behavior in $\text{Mo}/\text{CdIn}_2\text{S}_4/\text{ZnO-Al}$. Structures Based on Metastable Defects”, *ACS Applied Electronic Materials* 7,7572–7579 (2025)).

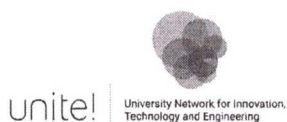
W rozdziale 5 doktorant opisał kompleksowe badania elektryczne uzupełnione pomiarami fotoluminescencji dla dwóch serii warstw CdIn_2S_4 , gdzie w ramach każdej serii badano próbkę nie wygrzewaną, próbkę wygrzewaną w próżni oraz próbkę wygrzewaną w atmosferze siarkowej. Poprzez te badania, tj. pomiary elektryczne z podświetleniem, jednoznacznie wykazano, że materiał ten posiada metastabilne defekty (przewodnictwo badanych próbek zmienia się o rzędy wielkości na skutek podświetlenia), a proces wygrzewania istotnie wpływa na ich koncentrację (przewodnictwo zmienia się rzędy wielkości po wygrzewaniu). Badania te zinterpretowano w ramach modelu pasmowego uwzględniającego położenie energetyczne defektów punktowych, a w tym defektów metastabilnych. Model ten został zaadoptowany z wcześniejszych badań dla tego sytemu oraz odpowiednio zmodyfikowany na podstawie uzyskanych wyników w celu wytłumaczenia uzyskanych wyników oraz interpretacji wyników dla kolejnych warstw CdIn_2S_4 i struktur z warstwami CdIn_2S_4 . Część tych wyników przedstawionych w rozdziale 5



została niedawno opublikowana: J. Zdziebłowski et al., *Thin Solid Films* 833, 140846 (2026).

Rozdział 6 opisuje wzrost warstw CdIn_2S_4 o różnej stechiometrii In/Cd i ich podstawową charakteryzację za pomocą XRD oraz fotoluminescencji. Warstwy te, a także memrystory opisane w rozdziale 7 oraz przyrządy neuromorficzne opisane w rozdziale 8 zostały wytworzone na University of Nantes. Badania opisane w tych rozdziałach zostały opublikowane w pracy J. Zdziebłowski, et al., *ACS Applied Electronic Materials* 7, 7572–7579 (2025) i stanowią główną część rozprawy w której doktorant potwierdził główną hipotezę badawczą tj. wykazał, że na bazie CdIn_2S_4 można wytworzyć neuromorficzne przyrządy półprzewodnikowe, których działanie opiera się na metamorficznych defektach punktowych. Charakterystyki prądowo-napięciowe przedstawione w rozdziale 7 dla układu $\text{Mo}/\text{CdIn}_2\text{S}_4/\text{AZO}$ wyraźnie wykazują zmiany w przebiegu na skutek przepływu ładunku, tj. wykazują histerezę, co ostatecznie można wykorzystać do konstrukcji neuromorficznych przyrządów półprzewodnikowych jak wykazano w rozdziale 8. Jest to obiecujący wynik mimo tego, że jest to memrystor nie spełniający testu dla idealnego memrystora. Wytlumaczenie zmian w charakterystykach I-V za pomocą metamorficznych defektów jest przekonujące i nie mam do tego wytłumaczenia zastrzeżeń mimo tego, że można tutaj spodziewać się alternatywnych wytłumaczeń opartych na innych metastabilnych defektach lub takich samych defektach ale z innymi parametrami. Ponadto należy tutaj pamiętać, że o ile w rozdziale 5 przeprowadzono bardzo rzetelne badania elektryczne dla wytworzonych warstw CdIn_2S_4 to w kolejnych rozdziałach badano materiał CdIn_2S_4 uzyskany w innych warunkach w innym laboratorium. Dlatego badane warstwy CdIn_2S_4 z pewnością różnią się pod względem bezwzględnej oraz względnej koncentracji defektów i w związku z tym dużo lepiej było by przeprowadzić wszystkie badania dla warstw CdIn_2S_4 otrzymanych w takich samych warunkach. Dodatkowo spodziewam się, że elementami które mogą odgrywać istotną rolę w badanych warstwach CdIn_2S_4 są atomy zanieczyszczeń oraz granice ziaren o których w mojej opinii doktorant nie wspomina wystarczająco w dysertacji. Dlatego chciałbym aby doktorant skomentował rolę tego typu defektów w CdIn_2S_4 podczas obrony oraz podał argumenty za tym aby można było je pominąć.

Podsumowując moją opinię uważam, że dzieło naukowe przedstawione mi do oceny jest oryginalne i zawiera bardzo wartościowy wynik naukowy tj. doktorant jednoznacznie wykazał, że metastabilne defekty w CdIn_2S_4 mogą być wykorzystane do budowy neuromorficznych przyrządów półprzewodnikowych. Ponadto w niniejszej rozprawie doktorant dowiódł, że posiada ogólną wiedzę z fizyki półprzewodników na wysokim poziomie, umie przeprowadzić pomiary oraz ich poprawną analizę i interpretację, a także potrafi formułować poprawne wywody naukowe, które bardzo dobrze się czyta. Należy również podkreślić, że niniejsza dysertacja jest bardzo dobrze zredagowana (znaleziono przeze mnie literówki i



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Account

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

uwagi co do sformułowań są bardzo nieliczne i podane są na końcu niniejszej recenzji). W związku z powyższym, uważam, że rozprawa doktorska Pana Jakuba Zdziebłowskiego spełnia wszystkie wymagania stawiane przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) oraz zwyczajowo przyjęte kryteria w środowisku fizyki ciała stałego. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgra Jakuba Zdziebłowskiego do publicznej obrony niniejszej rozprawy oraz wnioskuję o jej wyróżnienie.

Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie rozprawy:

Uważam, że osiągnięcie naukowe przedstawione w niniejszej dysertacji, które można nazwać: „wykorzystanie metastabilnych defektów w CdIn_2S_4 do budowy neuromorficznych przyrządów półprzewodnikowych” jest na wysokim naukowym poziomie co potwierdza publikacja J. Zdziebłowski, et al., ACS Applied Electronic Materials 7, 7572–7579 (2025). Za wyróżnieniem rozprawy przemawiają działające memrystory oraz neuromorficzne układy, a także przekonujące wytłumaczenie zmian rezystancji CdIn_2S_4 wywołanej przepływem ładunku oraz oświetleniem. Ponadto dysertacja jest bardzo starannie zredagowana, czyta się ją bardzo dobrze (choć długo >300 stron!) od samego początku do końca. Jest to poprawny językowo i merytorycznie opis znaczącego osiągnięcia naukowego, który zasługuje na wyróżnienie.

Robert Kudrawiec

Uwagi redakcyjne:

Strona v: czy na pewno 'The Memrystor' a nie 'The memrystor'

Strona 51: usunąć kropkę w '...thus. $dT = rdt...$ '

Strona 73: błąd w numerze rysunku '...3.3.43b...'

Strona 81: schemat na rys. 3.2.4 jest kontrowersyjny bo jest na nim nieciągłość pasm dla izotypowego złącza, mam świadomość, że jest to wzięte za referencją [176] ale jest to praca z 1963 roku i w tamtym czasie chyba nie było pełnej zgody co do nieciągłości pasm na złączach

Strona 97: '...Cd and In are isoelectronic [207]' Cd – 2 elektrony na powłoce walencyjnej, a In – 3 elektrony, dlatego nie można pisać, że są 'isoelectronic' chyba że chodzi o coś innego

Strona 102: w pierwszym zdaniu sugerował bym podkreślić, że jest to nominalnie niedomieszkowany CdIn_2S_4 i napisać 'nominally undoped CdIn_2S_4 ' lub 'non-intentionally doped CdIn_2S_4 '

Strona 115: tutaj zadeklarowano, że do pomiarów fotoluminescencji użyto długości fali 532nm, a na stronie 203 napisane jest, że użyto tą samą długość fali i jest to 514nm

Strona 128: mała litera w '...rate For curves...'

Strona 131: brak spacji w '...350meV.One...'

Strona 190: po myślniku konsekwentnie albo duża albo mała litera w czterech punktach

Strona 193: jak wyżej

Strona 263: kropka w niewłaściwym miejscu '...satisfactory. [185]. To...'

Strona 91: czy na pewno '...n-type GaN to improve light absorption...'

unite! 
University Network for Innovation,
Technology and Engineering



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Account
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434