



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

WYDZIAŁ
FIZYKI

Prof. dr hab. Maria Kamińska
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa
tel. (022) 55 32 767

Warszawa, 16 lutego 2026 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego pt.
„Application of Chalcogenide Semiconductors in Artificial Neuromorphic
Devices”**

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego pt. „Application of Chalcogenide Semiconductors in Artificial Neuromorphic Devices” dokonana została biorąc pod uwagę Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Zgodnie z tą Ustawą wymogi co do rozprawy doktorskiej, obowiązujące Doktoranta i w szczególności odnoszące się do jego przypadku są następujące:

zgodnie z Art. 186. 1. „Stopień doktora nadaje się osobie, która:.....

3) posiada w dorobku co najmniej:

a) 1 artykuł naukowy opublikowany w czasopiśmie naukowym ...”,

zaś zgodnie z Art. 187

1. „ Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.....”
2. „Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,”
3. „Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, ...”
4. „Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim....”

W przedstawionej recenzji ustosunkuję się do tych wymogów, jak również innych przesłanych mi przez Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej, Dr. hab. inż. Jerzego Antonowicza, prof. uczelni.

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego ma formę pracy pisemnej i zawiera wyniki jego badań naukowych prowadzonych pod opieką Dr. hab. inż. Pawła Zabierowskiego, prof. uczelni z Politechniki Warszawskiej. Praca badawcza Doktoranta wpisuje się w obszar nauk fizycznych i inżynierijno-technicznych w zakresie inżynierii materiałowej, fizyki ciała stałego i elektroniki. Dotyczy możliwości zastosowania siarczku indowo-kadmowego (CdIn_2S_4) w roli aktywnego materiału dla urządzeń memrystorowych, dedykowanych neuromorficznym systemom obliczeniowym. Tematyka ta związana jest z jednym z najintensywniej rozwijanych obecnie kierunków badań - poszukiwaniem nowych, energooszczędnych architektur obliczeniowych, zdolnych sprostać rosnącym wymaganiom sztucznej inteligencji.

Badania nad sieciami neuromorficznymi oraz różnymi typami urządzeń memrystorowych stanowią dziś kluczowy kierunek rozwoju nanoelektroniki. Największe ośrodki badawcze i firmy technologiczne, takie jak IBM, Intel, HP, MIT czy Tsinghua University, intensywnie pracują nad układami inspirowanymi działaniem mózgu. Mózg od dawna fascynuje inżynierów, fizyków i informatyków, ponieważ stanowi przykład systemu obliczeniowego, który łączy ogromną moc przetwarzania, wynikającą z nierozdzielności pamięci i obliczeń oraz masywnej równoległości, z ekstremalną energooszczędnością, odpornością na uszkodzenia i zdolnością adaptacji. Jego funkcjonowanie, obejmujące dynamiczną reorganizację połączeń neuronalnych i plastyczność synaptyczną, stanowi biologiczną podstawę uczenia się i pamięci. To właśnie mózg jako złożony, samoadaptujący się system inspirował rozwój przyszłych technologii, nie tylko neuromorficznych układów elektronicznych, ale i nowych paradygmatów obliczeń, robotyki, sztucznej inteligencji, czy materiałów inteligentnych. Rozwiązania te mogą w przyszłości zastąpić lub uzupełnić klasyczną architekturę von Neumanna, ograniczaną przez barierę ogromnego zapotrzebowania na energię i barierę na dalszą miniaturyzację tranzystorów.

Żyjemy w czasach, w których technologia coraz częściej czerpie inspiracje z natury. Przykładem jest choćby fotosynteza, która stała się podstawą koncepcji ogniw barwnikowych Grätzela oraz badań nad ultra cienkimi absorberami światła. Neuromorficzne układy

elektroniczne wpisują się w ten sam nurt: próbują odtworzyć zasady działania mózgu, jego plastyczność, równoległość i energooszczędność, aby stworzyć systemy zdolne do uczenia się, adaptacji i przetwarzania informacji w sposób bardziej zbliżony do biologicznego. W ten sposób elektronika przyszłości staje się przykładem technologii, która napotkawszy na fundamentalne bariery rozwojowe, poszukuje nowych, radykalnych rozwiązań dzięki inspiracji naturą.

Podjęte przez Pana mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego prace badawcze przedstawione w rozprawie doktorskiej stanowią istotny wkład w rozwój technologii urządzeń memrystorowych, które są **kluczowym elementem neuromorficznych układów obliczeniowych**, ponieważ potrafią odwzorować podstawową funkcję biologicznych synaps — zmianę przewodnictwa w zależności od historii pobudzeń. Dzięki temu mogą jednocześnie przechowywać i przetwarzać informacje, co pozwala ominąć ograniczenia klasycznej architektury von Neumanna i realizować obliczenia typu tzw. *compute-in-memory*. W neuromorficznych systemach urządzenia memrystorowe służą do implementacji plastyczności synaptycznej (STP — *Short-Term Plasticity*, LTP — *Long-Term Potentiation*, STDP — *Spike-Timing-Dependent Plasticity*), umożliwiając uczenie się i adaptację w sposób zbliżony do biologicznego. Większość konstruowanych współcześnie urządzeń memrystorowych opiera się na mechanizmach takich jak migracja jonów (czy luk) i tworzenie przewodzących (lub półprzewodzących) filamentów (ECM/VCM - *Electrochemical Metallization/ Valence Change Mechanism*), przełączanie fazowe w materiałach typu GST (chalkogenidowe materiały zmiennofazowe), modulacja bariery Schottky'ego, czy pułapkowanie ładunku w tlenkach metali. Mechanizmy te, choć szeroko stosowane, wiążą się z ograniczoną stabilnością, trudnością kontroli oraz znacznym zużyciem energii. Na tym tle wyjątkowość podejścia Doktoranta do konstrukcji urządzeń memrystorowych z wykorzystaniem **metastabilnych defektów w siarczku indowo-kadmowym (CdIn_2S_4)** polega na tym, że przełączanie rezystancji wynika nie z ruchu jonów ani zmian strukturalnych, lecz z kontrolowanej zmiany stanu ładunkowego defektów typu negative-U. W literaturze praktycznie nie występują prace, które wykorzystywałyby **metastabilne defekty półprzewodnikowe** jako świadomie zaprojektowany mechanizm działania memrystora, a tym bardziej w kontekście neuromorficznych funkcji synaptycznych (tylko dwie prace jednej grupy badawczej w ostatnich latach, wykorzystujące CdS, o nieporównywalnie mniejszym poziomie analizy eksperymentalnej w stosunku do prac

Doktoranta). Zaproponowany przez Doktoranta mechanizm otwiera drogę do nowych, stabilnych i energooszczędnych elementów neuromorficznych, w których funkcjonalność wynika bezpośrednio z fizyki materiału, a nie z procesów destrukcyjnych lub trudnych do kontrolowania zjawisk jonowych. W tym kontekście niniejsza praca stanowi **wyraźne przesunięcie granicy *state of the art***. Po raz pierwszy zaproponowano i eksperymentalnie potwierdzono, że siarczek indowo-kadmowy (CdIn_2S_4), materiał znany dotąd głównie z fotowoltaiki i fotokatalizy, może pełnić rolę **aktywnej warstwy memrystorowej**, w której przełączanie rezystancji jest kontrolowane przez **metastabilne defekty typu negative-U**. Jest to podejście nowe i wspólnie z wspomnianymi pracami dotyczącymi CdS, otwierające zupełnie nieeksplorowany kierunek projektowania elementów pamięciowych. Znaczenie pracy podkreśla również fakt, że po raz pierwszy zademonstrowano **neuromorficzne zachowania** urządzeń opartych na CdIn_2S_4 , takie jak liniowa potencjacja, krótkotrwała i długotrwała plastyczność, PPF (paired-pulse facilitation, czyli facylitacja pary impulsów), czy podobne stymulacje, i to uzyskane nie tylko na drodze elektrycznej, ale i optycznej. Pokazuje to, że metastabilne defekty mogą pełnić funkcję analogiczną do biologicznych synaps, umożliwiając realizację obliczeń typu *compute-in-memory*. W rezultacie recenzowana praca doktorska proponuje **nowy paradygmat urządzeń memrystorowych opartych na fizyce defektów**, wskazując CdIn_2S_4 jako obiecujący materiał dla przyszłych neuromorficznych układów obliczeniowych.

Doktorant, prowadząc swoje badania, niewątpliwie wykorzystał cenny kapitał naukowy zbudowany na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej w grupie Prof. dr hab. Małgorzaty Iglason, a następnie rozwijany przez jej wychowanka, Dr. hab. inż. Pawła Zabierowskiego, prof. uczelni - promotora Doktoranta, dotyczący defektów i metastabilności materiałów CIGS. Publikacje Politechniki Warszawskiej, powstałe w kontekście badań nad materiałami CIGS dla fotowoltaiki, są dobrze znane w środowisku naukowym, były cytowane tysiące razy i znacząco przyczyniły się do powiązania zjawisk metastabilnych w CIGS z kompleksem dwuluk selenu i miedzi, $V_{\text{Se}}-V_{\text{Cu}}$. Choć CdIn_2S_4 i CIGS są chemicznie i strukturalnie różnymi półprzewodnikami, w obu materiałach występują defekty metastabilne, które pod wpływem podświetlania zmieniają konfigurację, prowadząc do trwałego fotoprądu.

W rozprawie doktorskiej Pana mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego, napisanej w języku angielskim, znajdujemy kolejno:

- **Streszczenie pracy w języku angielskim i polskim** (spełnione wymaganie ustawowe).

- **Rozdział 1**, w którym Doktorant przedstawia dynamiczny rozwój technologii elektronicznych, od prawa Moore'a po współczesną sztuczną inteligencję, podkreślając problemy rosnącego zużycia energii przez modele AI oraz ograniczenia klasycznej miniaturyzacji elektroniki. Autor wskazuje, że biologiczny mózg, działający na fizycznej sieci neuronów, jest nieporównywalnie bardziej energooszczędny i szybki, co inspiruje rozwój neuromorficznych systemów obliczeniowych. W tym kontekście pojawia się urządzenie memrystorowe - element elektroniczny z pamięcią, jako kandydat na sztuczną synapsę. Rozdział prowadzi do podania głównego celu pracy: zbadania, czy metastabilne defekty w chalcogenkach, zwłaszcza w CdIn_2S_4 , mogą stanowić podstawę zachowania memrystorowego i posłużyć do budowy neuromorficznych urządzeń.

- **Rozdział 2**, w którym Doktorant przedstawia podstawy teoretyczne memrystora, poczynwszy od jego definicji zaproponowanej przez Leona Chua w 1972 roku jako czwartego elementu obwodów elektrycznych, którego rezystancja zależy od historii przepływającego ładunku. Omawia charakterystyczne cechy memrystorów, takie jak „ściśnięta” pętla histerezy (pinched hysteresis loop) oraz ich potencjał jako nieulotnych, analogowych elementów pamięci. Autor opisuje również kontrowersje i krytykę związaną z istnieniem idealnego memrystora oraz nadużywanie tego pojęcia w literaturze. Następnie opisuje biologiczne podstawy plastyczności synaptycznej oraz modele neuronów, a także wskazuje, dlaczego klasyczna architektura von Neumanna staje się niewystarczająca i jak memrystory mogą wspierać rozwój neuromorficznych układów.

- **Rozdział 3**, w którym Doktorant przedstawia teoretyczne podstawy niezbędne dla zrozumienia dalszej części pracy, koncentrując się głównie na fizyce zjawisk związanych z defektami metastabilnymi. Autor wyjaśnia naturę defektów o ujemnej energii korelacji (tzw. centra typu negative-U), ich opis za pomocą diagramów współrzędnych konfiguracyjnych oraz ich kluczową rolę w zjawisku trwałej fotoprzewodności (PPC). Omówione są również modele opisujące kinetykę defektów metastabilnych oraz metody badawcze wykorzystywane do ich analizy, takie jak TSC (termicznie stymulowany prąd) oraz analiza przewodnictwa AC, wraz z ich interpretacją i powiązaniem z mechanizmami transportu nośników.

- **Rozdział 4**, w którym Doktorant przedstawia aktualny stan wiedzy o CdIn_2S_4 , półprzewodniku o strukturze spinelowej, który był intensywnie badany w latach 60.–80., a następnie ponownie zyskał zainteresowanie dzięki zastosowaniom fotokatalitycznym i

fotowoltaicznym. Autor omawia strukturę krystaliczną, inwersję spinelową, a także bogatą literaturę dotyczącą fotoluminescencji i fotoprzewodnictwa, z której wyłania się złożony obraz defektów, zwłaszcza antystrukturalnych centrów In_{Cd} i Cd_{In} (odpowiednio stanów T i E) oraz luk siarki V. Istotne dla dalszych rozważań w pracy są przedstawione wyniki istniejących w literaturze obliczeń *ab initio* wskazujące na istnienie złożonych defektów o ujemnej energii korelacji, które mogą odpowiadać za metastabilność materiału. Rozdział podkreśla również liczne doniesienia o efektach pamięciowych i histerezie w czystych kryształach CdIn_2S_4 , co czyni ten materiał obiecującym kandydatem do zastosowań memrystorowych i neuromorficznych. Autor kończy ten rozdział szeregiem znaków zapytania co do struktury i defektów w tym materiale, na które w istniejącej literaturze nie ma odpowiedzi.

- **Rozdział 5**, w którym Doktorant opisuje przeprowadzone przez siebie badania cienkich warstw CdIn_2S_4 o różnej stechiometrii i poddanych różnym obróbkom termicznym (wygrzewanie w próżni, wygrzewanie w parach siarki), których celem było zrozumienie defektów metastabilnych oraz zjawisk pamięciowych, takich jak trwała fotoprzewodność (PPC) i trwała fotosensytywność (PPS). Istniejąca wiedza na ten temat była fragmentaryczna, kiedy doktorant zaczynał swoje badania CdIn_2S_4 . Pomiary fotoluminescencji ujawniły charakterystyczne piki odpowiadające znanym defektom (T, E, V, V_{Cd}). Pomiary przewodnictwa wykazały trzy wyraźne grupy zachowań oraz zmianę położenia poziomu Fermiego w zależności od obróbki termicznej warstw, co autor interpretuje jako efekt spinelowej inwersji i zmian w koncentracji luk siarki. Wyniki te posłużyły do budowy spójnego modelu CdIn_2S_4 , opisującego zachowanie tego materiału i stanowiącego fundament do projektowania opartych na nim urządzeń memrystorowych.

- **Rozdział 6**, w którym Doktorant opisuje proces wytwarzania cienkich warstw CdIn_2S_4 przeznaczonych dla urządzeń memrystorowych. Warstwy CdIn_2S_4 otrzymane zostały metodą ewaporacji termicznej we współpracy z Instytutem Jean Rouxel w Nantes, stosując następujące źródła: CdS, In, S. Autor, korzystając z wcześniej opracowanego modelu CdIn_2S_4 , zaprojektował serię eksperymentów mających na celu kontrolę defektów metastabilnych przez zmianę stechiometrii, temperatury wzrostu, stopnia inwersji spinelowej oraz obróbki termicznej. Przedstawia szczegółowy plan syntezy wielu serii cienkich warstw, z użyciem różnych podłoży i temperatur wzrostu, a także z dodatkowymi procesami wygrzewania i hartowania. Analiza otrzymanych warstw (EDX, XRD) ujawniła silną zależność składu i struktury krystalicznej (przejście amorficzno-krystaliczne, tekstura) od temperatury wzrostu i

materiału podłoża. Ważną obserwacją był wzrost stosunku In/Cd wraz ze wzrostem temperatury podłoża przez odparowywanie CdS, nasilające się przy wyższych temperaturach. Autor wskazuje liczne kierunki dalszych badań, podkreślając, że pełna analiza właściwości otrzymanych warstw będzie możliwa dopiero po wykonaniu pomiarów elektrycznych i bardziej zaawansowanych badań strukturalnych.

- **Rozdział 7**, w którym Doktorant prezentuje projektowanie i testowanie urządzeń memrystorowych opartych na cienkich warstwach CdIn_2S_4 . Autor opracował dwie koncepcje architektury urządzeń memrystorowych: urządzenia tunelowe, które okazały się technologicznie nierealne oraz urządzenie oparte na modulacji złącz prostowniczych. Przedstawił właściwości prototypowych struktur od pierwszych prób z symetrycznymi strukturami $\text{AZO}/\text{CdIn}_2\text{S}_4/\text{AZO}$ dla urządzeń tunelowych, przez konstrukcje z elektrodami molibdenowymi, aż po finalną, najbardziej udaną architekturę $\text{Mo}/\text{CdIn}_2\text{S}_4/\text{AZO}$. Kluczowym wynikiem jest obserwacja tzw. „pinched hysteresis loop” w tych ostatnich strukturach - pierwszy tego typu wynik dla urządzenia opartego na CdIn_2S_4 , co dowodzi możliwości wykorzystania tego materiału w urządzeniach memrystorowych. Na podstawie analizy charakterystyk prądowo-napięciowych Doktorant zaproponował bardzo elegancki model skonstruowanego urządzenia memrystorowego jako dwóch przeciwstawnych złącz prostowniczych w szeregu: diody Schottky $\text{Mo}/\text{CdIn}_2\text{S}_4$ i isotypowego n-n+ złącza $\text{CdIn}_2\text{S}_4/\text{AZO}$. Działanie urządzenia odbywa się dzięki przełączaniu pomiędzy tymi dwoma przeciwnie spolaryzowanymi złączami, a proces przełączania między stanami aktywności alternatywnie jednego lub drugiego złącza zależy zarówno od ich polaryzacji, jak i stanu defektów w warstwie CdIn_2S_4 . Oznacza to, że przejścia $\text{HRS} \leftrightarrow \text{LRS}$ są sterowane metastabilnymi defektami w CdIn_2S_4 , które modułują złącza prostownicze. Nośnikami pamięci są metastabilne defekty w stanie N^+ , których lokalne nagromadzenie przy złączu wpływa na barierę potencjału i wielkość przewodnictwa. Taki model tłumaczy obserwowaną zależność procesu przełączania od temperatury, szybkości narastania napięcia oraz oświetlenia. Doktorant stwierdza, że ze względu na niską różnicę prądów dla górnej i dolnej histerezy urządzenia nie są idealne jako pamięć binarna, ale dzięki powolnej dynamice są znakomitymi kandydatami dla neuromorficznych synaps analogowych. W końcówce rozdziału Autor wykazuje, że urządzenie CdIn_2S_4 jest memrystorem w sensie praktycznym, ale nie jest idealnym memrystorem Chua, gdyż ma pętlę histerezy, ma pamięć, ma dynamikę defektów, ale nie spełnia matematycznej definicji zależności $R(q)$. Pokazuje tym świetne zrozumienie koncepcji idealnego,

niezrealizowanego do dnia dzisiejszego memrystora Chua oraz swoją ostrożność i precyzję naukową w formułowaniu wniosków.

- **Rozdział 8**, w którym Doktorant prezentuje kluczowy rezultat całej pracy: neuromorficzne zachowanie urządzeń opartych na CdIn_2S_4 . Pokazuje, że mimo niestabilności i dużej zmienności między próbkami, możliwe jest uzyskanie struktur wykazujących podstawowe funkcje synaptyczne, takie jak:

- potencjacja (przy odpowiednim dostrojeniu parametrów impulsów uzyskał liniowy wzrost wagi synaptycznej i dla najlepszej struktury ponad 400% wzrost przewodnictwa),

- depresja dla jednozłączowego urządzenia (przypadkowo powstał w nim kontakt omowy); natomiast w zaproponowanym urządzeniu nie można uzyskać depresji ze względu na architekturę podwójnej diody,

- związana z potencjacją krótkotrwałą i długotrwałą plastyczność (STP/LTP) wraz uzyskaniem stanów STM i LTM; zanik pamięci następuje ze względu na relaksację defektów metastabilnych - dla jednego z urządzeń uzyskano krótszą stałą czasową, odpowiadającą szybkiemu „zapominaniu” - analog STM i dłuższą stałą, odpowiadającą powolnej relaksacji - analog LTM,

- facylitacja pary impulsów (paired-pulse facilitation, PPF), której mechanizm fizyczny związany jest ze zwiększeniem lokalnego stężenia defektów N^+ przez pierwszy z impulsów, które to defekty następnie eksponencjalnie relaksują, a drugi impuls dodaje kolejną porcję defektów N^+ ; możliwe było uzyskanie PPF do 125%,

- optyczna modulacja przewodnictwa – pokazano optyczną potencjację oraz optyczne PPF (maks. $\sim 55\%$, prawdopodobnie z powodu ograniczonej mocy oświetlenia). Autor przeprowadza eksperyment z 10 seriami po 10 impulsów. Między seriami obserwuje się relaksację prądu, którą można traktować jako „zapominanie”. Stała zaniku nasycy się po siódmej próbie, co można przypisać przejściu od pamięci krótkotrwałej do długotrwałej. Mechanizm ten wiąże się z gyratorem kwantowym i zjawiskiem trwałego nasycenia fotoprądu. Skonstruowane urządzenia reagują zatem zarówno na impulsy elektryczne, jak i świetlne, a najlepsze wyniki uzyskano dla warstw o stosunku $\text{In}/\text{Cd} \approx 2$, co oznacza po prostu związek CdIn_2S_4 . Czasowe stałe odpowiedzi urządzeń powiązano z dynamiką metastabilnych defektów, co potwierdza zasadność całej koncepcji pracy doktorskiej. Rozdział kończy się wnioskiem, że choć urządzenia wymagają dalszej optymalizacji, CdIn_2S_4 rzeczywiście może stanowić podstawę funkcjonalnych elementów neuromorficznych.

- **Rozdział** końcowy **9**, w którym Doktorant podsumowuje całą pracę, jednoznacznie potwierdzając, że metastabilne defekty w chalcogenkach, na przykładzie CdIn_2S_4 , mogą być wykorzystane jako źródło zachowania memrystorowego i stanowić podstawę urządzeń neuromorficznych. Autor podkreśla, że przedstawione badania przynoszą pełny dowód koncepcji: zarówno model materiałowy, jak i działające prototypy urządzeń wykazały oczekiwane właściwości pamięciowe i synaptyczne. Jednocześnie rozdział wskazuje liczne otwarte problemy i kierunki dalszych badań (zawiera imponującą listę 23 otwartych zagadnień badawczych), obejmujące m.in. dokładniejsze pomiary transportu, analizę defektów, optymalizację złączy oraz poszukiwanie innych spineli o silniejszej metastabilności. Wreszcie Doktorant zauważa, że choć idea memrystora opartego na metastabilności nie jest całkowicie nowa, bo ostatnio zaproponowano w tym celu struktury na CdS , to przedstawione wyniki pokazują, że takie podejście jest bardzo naturalne i może dotyczyć wielu struktur półprzewodnikowych, znanych i badanych ze względu na metastabilne defekty od wielu lat. Rozdział 9 to nie tylko finał pracy, ale też moment, w którym autor pokazuje, że potrafi patrzeć na swoje badania z pokorą badacza i śmiałością odkrywcy.

- Bogatą **bibliografię**, zawierającą 272 dobrze dobrane pozycje.
- **Listę publikacji** i prezentacji konferencyjnych Doktoranta.
- **Spis rysunków i Tabel** pracy doktorskiej.
- Bardzo wygodny dla czytających **spis** użytych w pracy **symboli**. Tu jednak uwaga krytyczna – nie wszystkie symbole użyte w pracy zostały tam zawarte. Ponadto konieczny wydaje się jeszcze spis użytych w tak obszernej pracy skrótów i tego spisu bardzo brakowało recenzentowi.

- **16 dodatków** dotyczących wyników specyficznych pomiarów oraz zawierających spis przeprowadzonych procesów wraz ze specyfikacją, jak również listę wytworzonych próbek.

Ten układ rozprawy doktorskiej jest jak najbardziej właściwy i pozwala zapoznać się z motywacją pracy, aktualnym stanem nauki w obszarze dotyczącym doktoratu i prześledzić wyniki Doktoranta oraz ich analizę. Zastosowane piśmiennictwo oceniam też jako bardzo dobrze dobrane. Wykorzystane metody badawcze zarówno samego materiału aktywnego CdIn_2S_4 , jak i struktur na jego bazie oceniam bardzo wysoko, pomimo że i sam Doktorant jest przekonany co do potrzeby dalszych badań – ale taka jest natura nauki.

Najważniejszymi osiągnięciami pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego są moim zdaniem:

1. **Pierwsza na świecie demonstracja neuromorficznego urządzenia z CdIn_2S_4 jako warstwą aktywną.** Praca przedstawia pierwsze eksperymentalne urządzenia memrystorowe oparte na CdIn_2S_4 , pokazując, że materiał ten, dotąd nieużywany w tej roli, może pełnić funkcję sztucznej synapsy.
2. **Identyfikacja nowego** (jak dotąd tylko jedna grupa naukowa na świecie opublikowała konstrukcję podobnie działającego urządzenie na innym materiale - CdS) **mechanizmu przełączania memrystorowego opartego na dwóch złączach prostowniczych i metastabilnych defektach.** Doktorant proponuje i uzasadnia mechanizm, w którym zmiana rezystancji wynika z **przełączania stanów ładunkowych metastabilnych defektów** i ich wpływu na **wysokość barier interfejsowych**. To ważne odkrycie - **pokazanie, że modulacja barier interfejsowych może pełnić funkcję memrystorową**, gdy większość memrystorów działa dzięki procesom destrukcyjnym (migracja jonów, filamenty, redoks), a tutaj funkcjonalność wynika z kontrolowanej fizyki interfejsu.
3. **Eksperymentalna demonstracja neuromorficznych funkcji synaptycznych zarówno w wyniku stymulacji elektrycznej, jak i optycznej.** Urządzenia wykazują:
 - potencjację przewodnictwa,
 - krótkotrwałą i długotrwałą plastyczność (STP/LTP),
 - odpowiedzi impulsowe przypominające biologiczne synapsy.To potwierdza, że CdIn_2S_4 może być użyty w układach neuromorficznych.
4. **Doprecyzowanie modelu CdIn_2S_4 z uwzględnieniem kluczowych defektów tego materiału oraz analiza wpływu obróbki po-depozycyjnej na stopień inwersji i koncentrację defektów, w tym luk siarkowych.** W szczególności dotyczy to zmian przewodnictwa, położenia poziomu Fermiego, intensywności luminescencji oraz szerokości przerwy energetycznej.

Wykazanie przez Doktoranta, że metastabilne defekty mogą być świadomie wykorzystane jako mechanizm działania memrystora przesuwa granicę *state of the art* w zakresie urządzeń memrystorowych: defekty, które w fotowoltaice uznaje się za problem, tutaj stają się **zasobem funkcjonalnym**. Praca Doktoranta **otwiera nowy kierunek badań w neuromorficznej elektronice**, pokazując, że chalcogenki o strukturze spinelowej, a w

ogólności półprzewodniki z defektami metastabilnymi, dotąd pomijane w memrystorach, mogą stanowić nową klasę materiałów dla energooszczędnych układów obliczeniowo-pamięciowych.

Praca doktorska mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego zawiera zatem wiele istotnych i pionierskich osiągnięć dotyczących zastosowania materiałów chalkogenkowych z defektami metastabilnymi w urządzeniach memrystorowych, uzyskanych dzięki przemyślanej konstrukcji eksperymentów i rzetelnym badaniom. Pewnym mankamentem jest jednak duża niepowtarzalność technologii oraz fakt, że część pożądanых rezultatów została osiągnięta niejako metodą prób i błędów. Autor bardzo dogłębnie analizuje każdą badaną próbkę i stara się zrozumieć oraz wyjaśnić jej zachowanie, lecz jego obecny stan wiedzy nie pozwala mu jeszcze na uzyskanie pełnej powtarzalności wyników. Można to jednak usprawiedliwić pionierskim charakterem podjętych badań.

Z perspektywy fizyki pewne zastrzeżenia budzi opis proponowanego modelu działania urządzenia memrystorowego - zarówno w warstwie słownej, jak i graficznej. Choć generalnie rysunki są bardzo udane jeśli chodzi o przedstawienie koncepcji modelu, brakuje w nich zachowania właściwych proporcji wysokości pasm przy przykładowym napięciu. We wstępnych opisach zabrakło mi również klasycznego omówienia działania diody Schottky'ego, w szczególności zależności szerokości obszaru zubożonego od napięcia oraz przełożenia tych zjawisk na funkcjonowanie złączy w urządzeniu memrystorowym, gdzie wysokość bariery jest mieszana z jej transmisją wynikającą z wysokości i szerokości. Nie umniejsza to jednak wartości samej idei zaproponowanego modelu, która pozostaje wyjątkowo trafna i oryginalna.

Doktorant w znakomity też sposób i bardzo dogłębnie przedstawił w czterech pierwszych rozdziałach wiedzę niezbędną dla podjęcia proponowanej tematyki. Świadczy to o jego dużej dojrzałości naukowej i znakomitym zrozumieniu fizyki badanych zjawisk.

Praca doktorska Pana mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego została napisana poprawnym i klarownym językiem angielskim. Liczba literówek jest niewielka (te, które odnotowałam, są do wglądu dla Doktoranta w egzemplarzu, który otrzymałam). Zdarzało mi się jednak napotkać trudności związane z użytymi skrótami, ponieważ nie wszystkie zostały wyjaśnione w treści rozprawy. Nie do końca odpowiada mi również sposób formułowania zakończeń rozdziałów - choć słusznie wskazują one dalsze potrzeby i kierunki badań, to same podsumowania

przeprowadzonych prac są miejscami niepełne. Szata graficzna rozprawy stoi natomiast na bardzo wysokim poziomie.

Moje główne zastrzeżenie co do formy językowej i konstrukcji pracy dotyczy bardzo dużej objętości rozprawy, pojawiających się powtórzeń oraz momentami rozwlekłego stylu. Jestem przekonana, że przedstawiony materiał można byłoby ująć w znacznie bardziej zwięzłej formie, nie tracąc przy tym merytorycznej treści. Niemniej jednak praca stanowi niezwykle cenne i obszerne źródło wiedzy dla osób zainteresowanych tą tematyką, a omawiane zagadnienia są obecnie intensywnie badane w wielu laboratoriach na świecie. Tak szczegółowe omówienie problemów oraz częste powracanie do kluczowych kwestii może okazać się bardzo wartościowe dla badaczy rozpoczynających pracę w tej dziedzinie, zwłaszcza zajmujących się memrystarami opartymi na metastabilnych defektach. W tym kontekście jestem skłonna usprawiedliwić nietypowo duży wysiłek, jaki musieli włożyć recenzenci, a zapewne także promotor w czytanie rozprawy.

Poniżej drobne błędy znalezione w pracy:

- str.43 rysunek 3.1.1 – błędne oznaczenia przez odpowiednie strzałki wartości energii optycznej pułapkowania elektronu oraz energii optycznej emisji dziury;
- str.80 równanie 3.2.70a – błąd w znaku napięcia we wzorze na charakterystykę diody, który zniekształca tę charakterystykę;
- str.80 – drobne błędy w równaniu 3.2.71;
- str. 118, Tabela 5.2.1 – odwrotne przejście przypisane do natury piksu 1.76 eV;
- str. 125, Tabela 5.3.1 – absolutnie niezrozumiały jest wynik obliczeń wartości gęstości stanów pasma przewodnictwa , które dla tego samego materiału różnią się trzy rzędy wielkości – to wymaga wytłumaczenia;
- str. 140 – niepełne podpisy pod rysunkami;
- str. 157 niezrozumiała równość przedstawiona równaniem 5.4.1;
- str. 162 rys. 5.5.2 i podobnie str.256 rysunek 7.2.18 przy opisie górnej paraboli powinno być chyba $2(e+h)$, a nie $e+h$; ponadto skala energii na obu rysunkach jest mocno zaburzona.

Powyższe różnego typu uchybienia nie zmieniają mojego bardzo pozytywnego zdania o całej pracy doktorskiej, która przedstawia znaczącą wartość naukową i prezentuje wyjątkowo wysoki poziom merytoryczny i nowatorski. Powiedziałabym nawet, że stanowi solidny i

obszerny fundament dla rozwoju nowej koncepcji urządzeń memrystorowych, zbudowany dla międzynarodowego środowiska badaczy zajmujących się sieciami neuromorficznymi.

Zaprezentowany przez Doktoranta dorobek publikacyjny obejmuje na chwilę obecną 2 prace, jedną opublikowaną w czasopiśmie ACS Applied Electronic Materials (czasopismo ma wysoki tzw. Impact Factor (IF) równy 4.7), drugą zaś w Thin Solid Films (IF=2.2), oba czasopisma są z bazy Web of Science. Doktorant jest w obu publikacjach pierwszym autorem i jednocześnie autorem korespondencyjnym. Pierwsza praca ukazała się w 2025 roku, druga 1 stycznia 2026 roku i nie mają jeszcze żadnych cytowań. Obie publikacje obejmują znaczący materiał z rozprawy. Doktorant miał również prezentację ustną oraz dwie prezentacje plakatowe na konferencjach międzynarodowych. Jest również współautorem 3 innych prezentacji na międzynarodowych konferencjach.

Podsumowując recenzję uważam, że przedstawiona mi praca doktorska Pana mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego, przygotowana pod opieką promotora Dr. hab. inż. Pawła Zabierowskiego, prof. uczelni, z Politechniki Warszawskiej **stanowi oryginalne rozwiązanie problemów naukowych dotyczących zastosowania półprzewodników chalkogenkowych w urządzeniach memrystorowych**, dedykowanych neuromorficznym systemom obliczeniowym. Doktorant wniósł istotny wkład w stworzenie koncepcji nowych urządzeń memrystorowych, wykorzystujących metastabilność defektów w półprzewodnikach chalkogenkowych, skonstruował je, zbadał i wykazał możliwość osiągnięcia przez nie **neuromorficznych funkcji synaptycznych**, wykazując się głęboką wiedzą, umiejętnością analizy danych oraz zrozumieniem odpowiednich procesów fizycznych w materiałach półprzewodnikowych. Na tej podstawie można stwierdzić, że **Doktorant zaprezentował ogólną wiedzę teoretyczną, umiejętności eksperymentalne i modelowania procesów fizycznych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w zakresie fizyki, inżynierii materiałowej i urządzeń elektronicznych**. Jego praca doktorska spełnia zatem warunki stawiane pracom doktorskim, podane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). **W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Ponadto rozprawa zasługuje na wyróżnienie. Niestety Doktorant nie wypełnił warunku publikacyjnego, ustalonego przez Radę Naukową Dyscypliny Nauki Fizyczne. Chciałabym jednak raz jeszcze podkreślić, że Jego rozprawa jest w wielu aspektach pionierska i dotyczy

niezwykle ważnego, dynamicznie rozwijającego się kierunku badań. Jej wysoki poziom naukowy, aktualność tematyki, rzetelność wykonania oraz istotny wkład w rozwój światowej nauki, zasługują na uznanie. Rozprawa otwiera nowy kierunek w rozwoju neuromorficznej elektroniki, w którym defekty, dotąd postrzegane głównie jako problem technologiczny, stają się kluczowym zasobem umożliwiającym budowę energooszczędnych, inteligentnych systemów obliczeniowo-pamięciowych przyszłości.

Maria Kamińska

Maria Kamińska