

Warszawa, 9 grudnia 2025

Prof. dr hab. Marek Godlewski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
02-668 Warszawa
Al. Lotników 32/46

Recenzja pracy doktorskiej
Mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego zatytułowanej
„Application of Chalcogenide Semiconductors in Artificial
Neuromorphic Devices”
wykonanej w dziedzinie Nauk ścisłych i przyrodniczych, w
dyscyplinie naukowej Nauki fizyczne

Praca doktorska wykonana została w Zakładzie Półprzewodników, na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Pawła Zabierowskiego, profesora uczelni. Ponadto istotna (po części weryfikująca) część pomiarów do doktoratu wykonana została w czasie stażu naukowego kandydata we Francji (Uniwersytet w Lyonie).

Zacznę od nietypowego stwierdzenia, że złożony doktorat to prawdziwe wyzwanie dla recenzenta. Mam na myśli nie tylko rozmiar rozprawy (aż 355 stron, w tym 288 stron samej treści doktoratu, plus obszerny spis bibliografii (272 pozycje), spis dorobku naukowego kandydata, podziękowania, spis skrótów, rysunków, tabel i załączniki), ale także sposób jej spisania. Pracę nie czyta się łatwo. Trudność w czytaniu nie wynika z faktu, że jest napisana w języku angielskim, ale z użytego słownictwa. Autor (być może z pomocą AI?) opisuje swoje wyniki „barwnym językiem”, bardziej literackim, niż stosowanym w tekstach naukowych.

W moich recenzjach nigdy nie skupiam się na wyłapywaniu błędów językowych, czyli tzw. literówek, braku przecinków etc... Tych usterek językowych jest zresztą w złożonym doktoracie niewiele. W tym doktoracie zwracam jednak uwagę na błąd (niestety dosyć powszechny) w nazwisku wybitnego technologa. Nazwisko technologa, laureata

Nagrody Nobla, to Bridgman (Percy Williams Bridgman), a nie Bridgeman jak napisane jest na 98 stronie doktoratu.

Rozmiar złożonego doktoratu tłumaczy dlaczego nie analizuję zawartości poszczególnych części pracy, a skupiam się na uwagach dotyczących tematyki pracy, jej najważniejszych wyników i ustosunkowuję się do formy rozprawy. W rezultacie nastąpiła anty-korelacja pomiędzy rozmiarem rozprawy, a rozmiarem mojej recenzji.

Jeśli chodzi o konstrukcję pracy to czytając ją miałem wrażenie, że czytam dwa doktoraty połączone tematycznie. Pierwszy z nich (rozdziały 1-5) wykonany został na dostępnych w Polsce próbkach CdIn_2S_4 . Autor analizuje charakterystyki $I(V)$, próbuje wyjaśnić naturę defektów w tym materiale (CdIn_2S_4), a następnie powiązać obserwowaną metastabilność z właściwościami wybranego defektu, etc... Następnie (w rozdziałach 6-9) dodane są nowe wyniki wykonane w czasie stażu naukowego doktoranta we Francji dotyczące dokładnie tych samych zagadnień co opisane jest wcześniej. Nowe badania wykonano między innymi w celu weryfikacji wcześniejszych wyników. Ta część doktoratu, gdy wstawiona w użytej formie, robi wrażenie niezależnej pracy doktorskiej weryfikującej wcześniejszą pracę. Jest to dziwna konstrukcja doktoratu uzasadniona jedynie historią/kolejnością prowadzonych badań.

Zanim przejdę do przedstawienia moich uwag/komentarzy do treści doktoratu ustosunkuję się do dwóch podstawowych pytań kluczowych do oceny złożonej pracy doktorskiej. Pierwsze z nich dotyczy oceny wiedzy doktoranta w tematyce badań. **Na podstawie informacji zawartych w rozdziałach dwa i trzy jestem w pełni przekonany, że doktorant jest wybitnym specjalistą w tematyce memrystorów i układów elektronicznych naśladujących sieci neuronowe. Przedstawione w doktoracie wyniki są oryginalne i potwierdzają jego wysoką wiedzę dotyczącą skomplikowanych struktur półprzewodnikowych – memrystorów i sieci neuromorficznych.**

Drugie istotne pytanie dotyczy dojrzałości naukowej kandydata i oceny czy jest on gotowy do samodzielnej pracy naukowej. Bardzo wysoki poziom naukowy prowadzonych badań weryfikuje pozytywnie odpowiedź na to pytanie, Złożona praca dotyczy bardzo perspektywicznej tematyki naukowej Zarówno memrystory, jak i

budowane na ich podstawie urządzenia neuromorficzne, to w moim odczuciu przyszłość mikroelektroniki.

Złożona praca dotyczy „dziwnych” właściwości elektrycznych warstw CdIn_2S_4 , materiału pokrewnego do CIGS ($\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$) badanego w grupie promotora rozprawy od lat. CIGS badano w celu weryfikacji zastosowań fotowoltaicznych odpowiednich struktur. **Celem rozprawy było wyjaśnienie efektów metastabilnych w tym materiale, zweryfikowanie stosowalności warstw CdIn_2S_4 jako memrystorów, a docelowo zweryfikowanie możliwości tworzenia układów neuromorficznych naśladujących działanie naszych mózgów. W moim odczuciu wszystkie te cele zrealizowano z sukcesem. Ten fakt jest podstawą mojej wysokiej oceny złożonej pracy.** Co więcej, jak każda wartościowa praca, otwiera ona kolejne kierunki badań, stawia nowe pytania, etc...

Teraz chciałbym dodać komentarz dotyczący stosowalności pojęcia memrystor. W rozdziale drugim autor powołując się na pracę teoretyczną Leona D. Chua, pracę w której zdefiniowano pojęcie memrystora. **W moim odczuciu definicja podana w pracy L.D. Chua jest zbyt rygorystyczna.** To moje stwierdzenie można poprzeć na podstawie wyników złożonego doktoratu. Choć formalnie badane warstwy nie spełniają wszystkich kryteriów struktur memrystorowych (jak konkluduje autor doktoratu na podstawie bardzo zaawansowanych badań), to jednak warstwy CdIn_2S_4 mogą posłużyć do stworzenia nowego rodzaju komórek pamięci i co ważniejsze (**duży sukces doktoratu**) sieci neuromorficznych. W moim odczuciu do powyższych zastosowań wystarczające jest obserwowanie histerezy w zależnościach $I(V)$.

W dalszej części mojej recenzji nie opisuję zawartości poszczególnych części pracy. W zamian wymieniam dwie uwagi krytyczne dotyczące analizy i interpretacji uzyskanych w doktoracie wyników.

Uwaga pierwsza

Występowanie histerezy w zależności $I(V)$ wynika z efektów metastabilnych. Aby wyjaśnić to zjawisko należy zdefiniować strukturę defektową badanych warstw, jak i

wyjaśnić który z mechanizmów cytowanych na stronach 31 – 33 doktoratu odpowiada za efekt memrystorowy. Autor doktoratu podejmuje próbę identyfikacji odpowiedniego defektu i mechanizmu. **W moim odczuciu jest to w tym momencie dosyć ryzykowne.** Nawiązuję tu do dawnych prac dotyczących badania natury defektów EL2 i tzw. centrów DX w materiałach z grupy III-V. Z multum proponowanych wtedy modeli przetrwały próbę czasu wyłącznie te oparte o wyniki pomiarów rezonansowych – badania ESR i ODMR. To dopiero te badania pozwoliły zidentyfikować tzw. defekty anty-położeniowe jak i o ujemnej energii Urbacha (układy „negative-U”).

To dlatego proponowane w pracy identyfikacje defektów sieci odbieram jako hipotezy badawcze, ciągle wymagające dalszej interpretacji doświadczalnej. W szczególności ryzykowne są zawsze modele dotyczące luk. Mam tu na uwadze badania dotyczące podobnych defektów w sieci ZnO. Odpowiednie pasmo luminescencyjne (PL) w sieci ZnO zanikało po wygrzaniu próbek w tlenie. Na tej podstawie zaproponowano model defektu zawierającego lukę tlenową. Niestety, to, wydawałoby się oczywiste, wytłumaczenie odrzucono/podważono gdy okazało się, że wygrzanie w innych gazach (na przykład w azocie) także likwiduje odpowiednie pasmo PL.

Uwaga druga

Krytycznie oceniam sposób wyznaczania koncentracji nośników w warstwach opisany na stronie 178 pracy. Na jakiej podstawie autor przyjął, że ruchliwość nośników wynosi $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$? Wyniki uzyskane przez innych autorów pokazane na rysunku 5.7.1 na stronie 179 nie potwierdzają tego założenia. Ponadto nazwana przez autora doktoratu jako „klasyczna” zależność ruchliwości od temperatury $T^{-3/2}$ nie jest wcale taka klasyczna. Zależność temperaturowa ruchliwości zależy od dominacji danego kanału rozpraszania i istotnie zmienia się od stopnia domieszkowania, temperatury pomiaru i mikrostruktury warstw (rozpraszanie na granicy ziaren/kolumn). Dziwne, że nie przeprowadzono pomiaru efektu Halla aby zwiększyć dokładność wyznaczania koncentracji nośników.

Nie mam dalszych uwag krytycznych, a powyższe uwagi/wątpliwości nie umniejszają mojej wysokiej oceny złożonej rozprawy doktorskiej.

Podsumowanie recenzji

Podsumowując, uważam że uzyskane w rozprawie wyniki są **bardzo wartościowe**. Stwierdzam więc, że praca doktorska mgr. inż. Jakuba Zdziebłowskiego spełnia (z dużym nadmiarem) wszystkie wymagania formalne stawiane pracom doktorskim w odpowiednich ustawach (art. 13 ustawy z dnia 14.03.2003) i rozporządzeniach Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30.01.2018. Wnioskuje dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów postępowania.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Godlewski', is positioned to the right of the main text block.