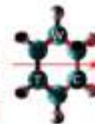




Wojskowa  
Akademia  
Techniczna

Wydział  
Nowych Technologii i Chemii



Warszawa, dn. 3 września 2024 r.

**płk prof. dr hab. inż. Małgorzata KOPYTKO**  
**Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego**  
**Wydział Nowych Technologii i Chemii**  
**Instytut Fizyki Technicznej**  
**ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2**  
**00-908 Warszawa**

#### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**pt. „Zbadanie właściwości optycznych niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych wykorzystywanych jako obszar aktywny detektorów na zakres średniej podczerwieni” autorstwa mgr. inż. Michała RYGAŁY**

opracowana na podstawie uchwały nr 586/43/RDND11/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne Politechniki Wrocławskiej z dnia 09.07.2024 r. oraz w zw. z art. 190 ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.)

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska pana mgr. inż. Michała Rygały ma charakter zarówno eksperymentalny, jak i polegała na symulacjach numerycznych przeprowadzonych przy pomocy oprogramowania nextnano. Przedmiotem badań były struktury półprzewodnikowe AlInBV, w szczególności supersieci II-typu służące do konstruowania detektorów średniej podczerwieni. Podjęta tematyka jest niezwykle ważna i aktualna. Detektory podczerwieni są wykorzystywane w zastosowaniach militarnych, przemysłowych, medycznych jak i komercyjnych, natomiast głównym wątkiem aplikacyjnym, nad którym skupił się Doktorant są systemy optycznej detekcji gazów. Celem prac prowadzonych nad supersieciami II-typu InAs/GaSb czy InAs/InAsSb jest poprawa parametrów przyrządów (emiterów i detektorów) oraz poszukiwanie rozwiązań pozwalających zastąpić wciąż najpowszechniejsze detektory konstruowane na w oparciu o HgCdTe, materiał najbardziej zaawansowany technologicznie i zapewniający najlepsze parametry detekcyjne, zawierający jednak pierwiastki toksyczne dla środowiska (kadm i rtęć).

Rozprawa ma łącznie 98 stron, włączywszy bardzo obszerną bibliografię (118 pozycji literaturowych), a wraz z wprowadzeniem i podsumowaniem składa się z 9 rozdziałów. Poprzedzona jest streszczeniem w języku polskim i angielskim, rozwinięciem skrótów oraz spisem treści.

Tytuł rozprawy odpowiada w pełni jej treści oraz zakresowi przeprowadzonych badań. W rozdziale 1. Doktorant dokonał wprowadzenia do technologii detekcji składu atmosfery, a także bardziej szczegółowo spektroskopii linii absorpcyjnych będącej główną motywacją przeprowadzonych badań. Doktorant zrezygnował z postawienia tezy badawczej, co nie jest błędem, nie dopatryłam się jednak precyzyjnie określonego celu badań, a także zdefiniowania problemów badawczych, mimo że jeden z podrozdziałów zatytułowany jest „Cel i zakres pracy”.

W rozdziale 2. Autor opisał materiały wykorzystywane do konstruowania detektorów podczerwieni, w tym stopy półprzewodnikowe HgCdTe, InSb, InAsSb, PbSe, PbS, struktury kwantowe (studnie kwantowe i supersieci II-typu) oraz alternatywne materiały dwuwymiarowe, a także wybrane konstrukcje detektorów podczerwieni. Błędy jakie dostrzegam, oprócz pomyłek edytorskich/stylistycznych, to stwierdzenie, że detektory na bazie InSb charakteryzują się wyższą wydajnością (tutaj też mam wątpliwość jaką wydajność Autor ma na myśli) w zakresie krótkofalowym od tych na bazie MCT, podczas gdy przerwa wzbroniona InSb nie pozwala na detekcję w zakresie średniofalowym. Nie rozumiem też stwierdzenia, że prostsza technologia wytwarzania tego materiału ma wpływ na wyższą wydajność.

Proszę o wyjaśnienie opisu supersieci (str. 16): jest to *wielokrotnie powtórzona studnia kwantowa o niewielkich lub pominiętych barierach*. Co znaczy słowo *niewielka*? Czy chodzi o wysokość bariery potencjału, czy raczej Autor miał na myśli szerokość bariery, oraz czy w przypadku *pominiętych barier* (czyli braku barier) uzyskamy supersieć.

Nie zgodzę się ze stwierdzeniem, że detektory z supersieci InAs/GaSb *wykazują lepsze niż MCT właściwości elektryczne, mniejsze ilości defektów strukturalnych i niższy prąd ciemny*. To jednak reguły Rule 07 czy Law 19 wyznaczone przez MCT są wciąż nieosiągalne dla innych systemów materiałowych.

Autor stosuje określenia *detektor fotoprzewodzący* (str. 20) dla urządzenia, które do poprawnego działania wymaga przyłożenia zewnętrznego pola elektrycznego. W klasyfikacji detektorów promieniowania detektor fotoprzewodzący jest fotorezystorem, natomiast detektorem, który może pracować przy braku zasilania, jak i przy zewnętrznym zasilaniu w kierunku zaporowym jest fotodiody, nazywana też detektorem fotowoltaicznym. Odrębnym typem urządzenia, traktowanym jako hybryda fotorezystora i fotodiody jest np. detektor nBn. Supersieci II-typu umożliwiają skonstruowanie przyrządu każdego rodzaju, należy jednak pamiętać o tym, że w fotodiodzie czy detektorze nBn transport nośników odbywa się w kierunku wzrostu, a w fotorezystorze w kierunku prostopadłym do kierunku wzrostu, co w supersieciach ma kluczowe znaczenie.

Dlaczego Autor uważa, że rekombinacja Augera wynika z rosnącego prądu tunelowania (str. 22)? Rekombinacja Augera jest mechanizmem fundamentalnym wynikającym ze struktury pasmowej półprzewodnika, natomiast prąd tunelowy

wynika z konstrukcji przyrządu i płynie w fotodiodzie pracującej przy polaryzacji zaporowej.

Doktorant stwierdza, że struktury typu "M" wykorzystują dodatkową barierę dla nośników większościowych w celu obniżenia prądu ciemnego. Struktura typu "M" dotyczy konstrukcji supersieci, gdzie klasyczna supersieć InAs/GaSb jest zmodyfikowana przez wstawienie warstwy AlSb do GaSb. Ze względu na to przesunięcie pasm, AlSb jest wykorzystana jako warstwa blokująca zarówno elektrony w paśmie przewodnictwa, jak i dziury w paśmie walencyjnym. Supersieć typu "M" wykazuje większe masy efektywne nośników w porównaniu z supersiecią InAs/GaSb, co w konsekwencji zmniejsza prawdopodobieństwo tunelowania w fotodiodach. Natomiast struktury, które wprowadzają dodatkową barierę dla nośników większościowych obniżając prąd ciemny to np. struktury typu nBn lub pBp (te drugie czasami określane jako pMp).

Poniżej kilka uwag dotyczących reguł Rule 07, Rule 22 i Law 19. Rekombinacja Augera 1 jest procesem, w którym udział biorą trzy nośniki – dwa elektrony i dziura ciężka. Jedynie reguły Rule 07 i Rule 22 zostały wyznaczone empirycznie, Law 19 wynika natomiast z prawa Plancka dla promieniowania ciała (promieniowania ciała o temperaturze 300 K). Ponadto Autor błędnie opisał warunki pracy BLIP. Mówi się, że detektor (pracujący w danej temperaturze i przy danej długości fali) jest ograniczony promieniowaniem ciała (BLIP limit), kiedy jego prąd ciemny jest mniejszy od fotoprądu wynikającego z promieniowania ciała – jest to najniższa nieprzekraczalna wartość prądu płynącego przez detektor.

W rozdziale 3. zostały przedstawione teoretyczne założenia opisujące zjawiska kwantowe, m.in. mechanizm tworzenia się pasm energetycznych w supersieciach oraz reguły wyboru rządzące przejściami optycznymi w tego typu strukturach. Poza drobnymi błędami edytorskimi, np. oznaczenie przerwy wzbronionej materiałów A i B w opisie równania (3.6) czy stylistycznymi, rozdział napisany jest poprawnie. Poniżej wymienię jedynie niektóre drobne uwagi. W definicji poziomu Fermiego należałoby dodać, że dotyczy ona układu znajdującego się w temperaturze zera bezwzględnego. Równanie Varshniego opisujące zależność temperaturową przerwy wzbronionej jest słuszne dla materiałów półprzewodnikowych z grupy AIII BV, np. dla wąskoprzerwowego HgCdTe przerwa wzbroniona zmienia się w odwrotny sposób z temperaturą niż w przypadku materiałów AIII BV.

W rozdziale 4. Autor omówił układy spektroskopowe wykorzystane w badaniach oraz metody numeryczne użyte do modelowania struktury pasmowej badanych materiałów. Jedynym z błędów jest użycie jednostki centymetra odwrotnego do wyrażenia częstości. W opisie układu do pomiaru fotoluminescencji Autor podał częstotliwość obrotu tarczy *choppera*, natomiast istotne jest podanie częstotliwości modulacji wiązki laserowej, która w przypadku modulacji mechanicznej zależy nie tylko od częstotliwości obrotu tarczy ale również od ilości szczelin w tarczy przecinającej wiązkę lasera.

Zasadniczą część rozprawy stanowią rozdziały od piątego do ósmego. Autor przedstawił w nich schematy badanych struktur epitaksjalnych, a także wyniki badań spektroskopowych wraz z ich interpretacją. Rozdział 5. Dotyczy badań optycznych

supersieci InAs/GaSb (8×8ML i 10×10 ML) wytworzonych w grupie z Ohio State University przy pomocy epitaksji z wiązek molekularnych. Doktorant wykonał badania fotoluminescencji i fotoodbicia, a wyniki eksperymentalne skonfrontował z obliczeniami numerycznymi. Pomiary fotoluminescencji w funkcji temperatury w zakresie od 10 K do 300 K pozwoliły określić parametry Varshniego dla badanych struktur o różnych periodach. W tym kontekście szkoda, że nie omówiono odstępstwa energii emisji od relacji Varshniego w zakresie niskich temperatur (od 10 K do ok. 70 K). Widoczne w charakterystyce optycznej próbki B (10×10 ML) dodatkowe przejście optyczne, o niewielkiej zależności energii od temperatury Autor zidentyfikował jako przejście z trzeciego stanu walencyjnego do pierwszego, oznaczone przez autora jako h3h1. Autor nie podjął dyskusji dlaczego podobne przejście nie było widoczne w charakterystyce optycznej próbki A. Zastanawiam się czy nie mogłoby być to przejście z głębokiego poziomu defektowego do pierwszego pasma dziur ciężkich? Czy obliczenia numeryczne potwierdziły nieznaczną zależność temperaturową przejścia h3h1?

Znacznie więcej przejść optycznych widocznych było w badaniach fotoodbicia, które w połączeniu z obliczeniami struktury pasmowej pozwoliły dokładnie zidentyfikować zaobserwowane przejścia. Autor nie podał jednak dla jakiej temperatury zostały wykonane obliczenia numeryczne (Rys. 5.6). Domyślam się, że była to temperatura 10 K. Również nie ma informacji dla jakiej temperatury zostały odczytane wyniki literaturowe, które zostały zestawione z otrzymanymi wynikami eksperymentalnymi w Tabeli 5.1.

Otrzymana w pomiarze fotoodbicia próbki B energia przejścia T1 jest zgodna z zależnością Varshniego. Tutaj również brakuje mi komentarza odnośnie tego, dlaczego wynik otrzymany w pomiarze fotoodbicia zgadza się, natomiast otrzymany w pomiarze fotoluminescencji odbiega od teoretycznej zależności Varshniego. Tutaj ciekawe byłoby porównanie temperaturowej zależności energii przejścia fundamentalnego otrzymanego w pomiarach fotoodbicia i fotoluminescencji na jednym wykresie.

Zauważam błąd w tekście na stronie 53. Autor opisał przejście T5 dla próbki B jako przejście do trzeciego ciężko-dziurowego stanu walencyjnego, powinno być czwartego (w tabeli przejście to oznaczone jest jako e1v4).

Jak sam Autor zauważył, ważnym aspektem badań opisanych w tym rozdziale była weryfikacja eksperymentalna teoretycznych przewidywań odnośnie zmiany charakteru funkcji falowych dla dwóch charakterystycznych wartości wektora falowego ( $k = 0$  i  $k = \pi/d$ ). Autor udowodnił zmienną naturę pasm energetycznych w paśmie walencyjnym analizując intensywność przejść optycznych w funkcji polaryzacji światła próbkującego. Tak szczegółowych badań nie spotkałam dotychczas w obszernej literaturze poświęconej badaniom przejść optycznych w supersieciach typu-II. Jest to moim zdaniem jeden z ważniejszych wyników rozprawy, szkoda że autor nie sformułował w oparciu o niego jednej z tez, których jak wspominałam na początku brakuje w rozprawie.

Rozdział 6. rozprawy również poświęcony jest supersieciom InAs/GaSb, w których modyfikowane były interfejsy pomiędzy warstwami InAs i GaSb w celu kontroli defektów. Badane próbki zostały wytworzone w Julius-Maximilians-Universität Würzburg w Niemczech metodą epitaksji z wiązek molekularnych. Autor badał dwie

struktury, w których modyfikowano interfejsy: relaksacji naprężenia metodą "soakingu" (próbka D) oraz poprzez umieszczenie monowarstwy InSb pomiędzy parami materiałów (próbka E), a także jedną próbkę referencyjną bez modyfikowanych interfejsów (próbka F). W podrozdziale 6.2 Doktorant opisał wyniki pomiarów fotoluminescencji. Tutaj, podobnie jak w podrozdziale 5.2, brakuje mi omówienia odstępstwa wyników eksperymentalnych od relacji Varshniego w zakresie niskich temperatur. W literaturze przesunięcie piku PL w kierunku niższych energii przypisywane jest efektowi lokalizacji nośników wynikającemu w szczególności z fluktuacji szerokości studni kwantowej GaSb. Wydawałoby się, że modyfikacja interfejsów może wpłynąć na jednorodność grubości składowych warstw supersieci, jednak charakterystyczna dla lokalizacji nośników zależność temperaturowa energii przejścia PL (w języku angielskim określana jako "S-shape") obserwowana jest dla każdej zbadanej próbki. Tutaj, podobnie jak w przypadku próbki B, energia przejścia fundamentalnego otrzymana w pomiarze fotoodbicia jest zbliżona do zależności Varshniego (267 meV dla próbki C).

Zauważam błąd w tekście na stronie 56. Zgodnie z Rys. 6.2b, wyznaczona z relacji Varshniego przerwa wzbroniona próbki D w 0 K powinna wynosić 257 meV, a nie 267 meV.

W podrozdziale 6.4 Doktorant porównał otrzymane wyniki eksperymentalne z obliczeniami numerycznymi. Tutaj jednym z ciekawszych aspektów jest pokazanie, że w rzeczywistej supersieci interfejs między warstwami składowymi jest zmodyfikowany nawet wtedy, gdy modyfikacje interfejsu nie były intencjonalnie wprowadzone w trakcie wzrostu.

W podrozdziale 6.5 Doktorant przedstawił wyniki czasowo-rozdzielczej absorpcji przejściowej. Za dłuższą stałą czasową rzeczywiście odpowiadają trzy procesy: rekombinacja promienista, Augera i SRH. Tutaj, mając zestaw parametrów wyznaczonych z dopasowania wyników obliczeń numerycznych do eksperymentu (m.in. przerwa wzbroniona, masy efektywne) można było pokusić się o teoretyczne obliczenia (za pomocą znanych zależności analitycznych) poszczególnych składowych czasu życia nośników.

Rozdział 7. Opisuje wyniki badań optycznych supersieci InAs/InAsSb. Doktorant porównał trzy próbki supersieci o tym samym składzie molowym antymonu w warstwie InAsSb, ale różniące się długościami periodu: 5, 6 oraz 8 nm. Badane próbki zostały wytworzone w Julius-Maximilians-Universität Würzburg w Niemczech metodą epitaksji z wiązek molekularnych.

W podrozdziale 7.2 Autor wskazuje, że wszystkie trzy próbki wykazywały podobne jak w przypadku supersieci InAs/GaSb odstępstwa energii emisji od reguły Varshniego w niskich temperaturach. Autor zidentyfikował dwa piki. W interpretacji wyników zupełnie pominął pik niskoenergetyczny. Natomiast na podstawie zależności od mocy pobudzania (Rys. 7.3b) zinterpretował pik wysokoenergetyczny jako związany z rekombinacją ekscytonową w 77 K i ten sam pik przypisał rekombinacji do stanu związanego lub rekombinacji defektowej donor-akceptor w 10 K. Autor nie napisał jednak o jakich ekscytonach mowa w 77 K. Ekscyton związany na zjonizowanych domieszkach obserwowany jest w materiałach półprzewodnikowych o odpowiednim stosunku mas efektywnych elektronów do dziur. Wobec tego, czy w badanym materiale obserwowane jest przejście na tego typu ekscytonie, czy może Autor miał

na myśli ekscytyny swobodnej? W dalszym zdaniu Doktorant stwierdził, że sygnał PL jest zdominowany przez rekombinację defektową w temperaturach niższych od 77 K. Brakuje mi informacji jakiego rodzaju są to defekty. Zachowanie kształtu litery "S" sygnału PL w funkcji temperatury jest konwencjonalnie interpretowane jako znak lokalizacji nośników w stanach końcowych pasma. Ponieważ takie zachowanie jest widoczne w różnego typu supersieciach (InAs/GaSb, InAs/InAsSb, czy też np. InGaN/AlGaN), warto byłoby się pokusić o dociekanie co jest powodem lokalizacji nośników: fluktuacja składu molowego materiału trójskładnikowego, fluktuacja grubości warstw, czy występowanie ewentualnych defektów w heterostrukturze. Można byłoby wykorzystać do tego obliczenia numeryczne wprowadzając np. niejednorodności potencjału. Nie wiem jednak czy w programie nextnano można zamodelować potencjał nie w postaci pojedynczej studni potencjału o periodycznych warunkach brzegowych, a w postaci kilku studni różniących się np. szerokością (sprawdzenie wpływu fluktuacji grubości warstw) czy głębokością (sprawdzenie wpływu fluktuacji składu molowego).

Podrozdział 7.3 poświęcony jest badaniom fotoodbicia. Podobnie jak w przypadku wcześniejszych próbek, otrzymana w pomiarze fotoodbicia energia przejścia T1 jest zgodna z zależnością Varshniiego. Tutaj również brakuje mi porównania temperaturowej zależności energii przejścia fundamentalnego otrzymanego w pomiarach fotoodbicia i fotoluminescencji na jednym wykresie i odpowiedniego komentarza.

Badania fotoodbicia połączone z obliczeniami numerycznymi pozwoliły Autorowi na wyznaczenie nieciągłości pasma walencyjnego (VBO) pomiędzy InAs a stopem  $\text{InAs}_{0.65}\text{Sb}_{0.35}$ . Jest to niewątpliwie wartościowa część pracy. Autor jednak podaje, że zmieniał parametr VBO w celu uzyskania zgodności wyników obliczeń z eksperymentem. Jednak w przypadku supersieci InAs/InAsSb innym parametrem dopasowania jest parametr zakrzywienia C ze wzoru (3.6), określający nieliniowość przerwy wzbronionej stopu potrójnego w funkcji składu molowego. Brakuje informacji jaka wartość parametru C dla stopu  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  została przyjęta w obliczeniach, lub kiedy Doktorant dysponował próbkami o jednym składzie molowym antymonu ( $x = 0.35$ ), jaka wartość przerwy wzbronionej  $\text{InAs}_{0.65}\text{Sb}_{0.35}$  została przyjęta w obliczeniach.

W podrozdziale 7.5 Doktorant ponownie przedstawił wyniki czasowo-rozdzielczej absorpcji przejściowej. Tutaj Autor stwierdził, że „*niemożliwe było jednoznaczne wyznaczenie ich (rekombinacji Augera i SRH) wkładu do zaniku sygnału o takim czasie, co pozwoliło na założenie, iż obserwowany sygnał jest związany wyłącznie z rekombinacją radiacyjną*”. Twierdzenie to jednak nie jest należycie uargumentowane. Rekombinacja SRH nie jest procesem fundamentalnym, zależy od jakości technologii, w związku z tym założenie, że w badanych próbkach powinna być rzędu dziesiątek  $\mu\text{s}$  (jak w cytowanej literaturze opisującej próbki z innych laboratoriów) nie jest uzasadnione. Jak wcześniej wspomniałam, wykonując proste obliczenia analityczne można było wyznaczyć wkład poszczególnych procesów (promienistego, Augera i SRH) do mierzonych stałych czasowych.

Rozdział ósmy opisuje badania rezonansowych diod tunelowych z warstwą absorpcyjną ze stopu GaInAsSb. Doktorant badał dwie próbki różniące się grubością

warstwy aktywnej. Badane próbki zostały wytworzone w Julius-Maximilians-Universität Würzburg w Niemczech metodą epitaksji z wiązek molekularnych.

Zaskakującym rezultatem było zaobserwowanie przejścia optycznego o wysokim stopniu polaryzacji liniowej. Obliczenia numeryczne pozwoliły na utożsamienie tego przejścia z dwuwymiarowym gazem dziurowym powstałym w obszarze trójkątnej studni kwantowej tworzącej się w pobliżu interfejsu absorbera i domieszkowanego na typ p GaSb. Wyniki badań absorpcji przejściowej pozwoliły Doktorantowi na wyznaczenie czasu rekombinacji promienistej przejścia spolaryzowanego oraz wskazywały na obecność zjawiska tunelowania nośników do dwuwymiarowego gazu z obszaru warstwy absorpcyjnej. Wyniki opisane w rozdziale są na tyle ciekawe i nowe naukowo, że w oparciu o nie mogła zostać sformułowana kolejna teza rozprawy.

W rozdziale 9. przedstawione zostało podsumowanie treści zawartej w recenzowanej rozprawie doktorskiej. Ponieważ Autor nie sformułował tezy/tez oraz w sposób jasny nie zdefiniował celu prowadzonych badań, trudno doszukiwać się w tym rozdziale uzasadnienia zdefiniowanego problemu badawczego. Znajduje się w nim jedynie podsumowanie treści zawartej w każdym rozdziale rozprawy doktorskiej. Autor dysponował bogatym materiałem badawczym, brakuje mi więc porównania różnych technologii, np. porównania czasów życia nośników w supersieciach InAs/GaSb i InAs/InAsSb. Ponieważ badane próbki pochodziły z tego samego laboratorium, wyznaczony czas życia nośników jest nie tyle wyznacznikiem jakości technologii, ale wynika z konstrukcji supersieci.

Od strony redakcyjnej, złożona rozprawa jest w większości tekstu napisana bardzo dobrze: starannie, zrozumiale i poprawnie merytorycznie, co potwierdza dużą wiedzę Doktoranta w zakresie prowadzonych badań. Rysunki są wykonane starannie, wszystkie w tej samej szacie graficznej. Autor nie ustrzegł się jednak drobnych potknięć edytorskich, lapsusów językowych, zwrotów żargonowych czy nieścisłości nomenklaturowych, niektóre z nich wymieniam poniżej:

- Autor używa określenia „średnia i długofalowa podczerwień”. Aby zachować jednolitą nomenklaturę autor powinien użyć określenia „średnia i daleka podczerwień” lub „podczerwień średnio- i długofalowa”.
- W wielu przypadkach Autor umieszcza przymiotnik oznaczający cechę trwałą lub mający funkcję kategoryzacyjną przed rzeczownikiem, np. *chemiczne reakcje, krótkie fale, ciemny prąd, termiczna podczerwień, fizyczne właściwości*. W języku polskim, inaczej niż w języku angielskim, przymiotnik, który wyraża najistotniejszą cechę przedmiotu, obiektu lub zjawiska, umieszczany jest po rzeczowniku, tj. *reakcje chemiczne, fale krótkie, prąd ciemny, podczerwień termiczna, właściwości fizyczne*. Natomiast zupełnie niepoprawne jest określenie *podczerwone detektory*, wyglądające jak bezpośrednie tłumaczenie z języka angielskiego. W języku polskim stosujemy określenie *detektory podczerwieni* lub *detektory promieniowania podczerwonego*.

- W rozdziale 2. Pojawie się stwierdzenie *pojedyncze stopy materiałowe*. Stop to materiał powstały przez połączenie co najmniej dwóch pierwiastków, więc chyba nie może być pojedynczy.
- Zamiast *niższa (wyższa) przerwa wzbroniona* powinno być *mniejsza (większa) przerwa wzbroniona* lub *węższa (szersza) przerwa wzbroniona*.
- Zamiast stwierdzenia *obszar negatywnej rezystancji* (str. 18) użyłabym *obszar ujemnej rezystancji*.
- Zamiast określenia *rekombinacja defektowa* powinno być, np. *rekombinacja wspomagana przez pułapkę* lub najprościej *rekombinacja SRH*.
- Zamiast stwierdzenia *opór elektryczny* (str. 26) powinno być *opór elektryczny właściwy*.
- W przypadku określenia *nieciągłość pasm* powinno być *nieciągłość krawędzi pasm*.
- HgTe jest półmetalem o *ujemnej* (odwrócona struktura pasmowa), a nie *zamkniętej* (zerowej) przerwie energetycznej.
- W nomenklaturze polskiej parametr  $D^*$  (z ang. *detectivity*), określany jest jako *wykrywalność* (a nawet ściślej *wykrywalność znormalizowana*), a nie jako *detekcyjność*. Nie ma również w języku polskim parametru *responsywność*, jest *czułość prądowa*, definiowana jako  $R_i = I_s/P_\lambda$ , gdzie  $P_\lambda$  jest mocą pochłanianą, a nie padającą (lub *napięciowa*,  $R_V = V_s/P_\lambda$ ). Ponadto w kilku miejscach w tekście pojawia się parametr określony przez Autora jako *wydajność detekcji*, a czasami tylko *wydajność*. Autor nie zdefiniował tego parametru, a ja zajmując się już kilkanaście lat tematyką detektorów fotonowych pierwszy raz spotykam się z tego typu nomenklaturą (*wydajność detekcji*). Czy autor miał na myśli *wykrywalność detektora* czy *wydajność kwantową detektora*? Parametry te nie mogą być stosowane zamiennie, mimo że pierwszy z nich zależy bezpośrednio od drugiego. *Wykrywalność detektora* jest dodatkowo ograniczona szumem prądowym.
- Symbol K (kelwin), podobnie jak °C, w odróżnieniu od „stopnia” określającego wartość kąta płaskiego, powinien być oddzielony spacją od wartości liczbowej, która go poprzedza. Ponadto zdarza się, że Autor używa kursywy do zapisu symboli wielkości fizycznych, co również jest zapisem błędnym.
- Autor pozostawia pojedyncze litery na końcach linii. Tak zwane „sieroty”, czyli przyimki i spójniki a, i, o, u, w, z powinny zostać przeniesione na początek kolejnego wiersza.



Podsumowując, uważam że uzyskane w rozprawie wyniki są bardzo wartościowe i wnoszą nową wiedzę dla obszaru badań nad nowymi materiałami półprzewodnikowymi stosowanymi do konstrukcji detektorów podczerwieni. Wprawdzie Doktorant nie zdefiniował jasno problemu badawczego, jednak wybrana metodyka badawcza – trzy różne techniki pomiarowe wraz z obliczeniami numerycznymi dają szeroki pogląd na właściwości badanych materiałów i mogą stanowić cenna wskazówkę dla badaczy zajmujących się osadzaniem kwantowych struktur półprzewodnikowych. Wiele uzyskanych przez Autora rezultatów jest nowych, co zostało potwierdzone publikacjami, które ukazały się w dobrych czasopismach naukowych. Zasadnicza część rozprawy w mojej opinii nie posiada wad głównych. Zauważone przeze mnie mankamenty, które z obowiązku recenzenta musiałam wskazać w trosce o dalszy rozwój kariery naukowej Doktoranta, zostały wymienione przy okazji omawiania zawartości pracy. Mankamenty te nie podważają w najmniejszym stopniu wysokiej jakości treści zawartych w rozprawie, a moja ocena jej jest jednoznacznie pozytywna.

**Stwierdzam zatem, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa spełnia kryteria określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Michała Rygały do publicznej obrony. Jednocześnie doceniając znaczenie przedstawionych w rozprawie rezultatów składam wnioszek o wyróżnienie doktoratu.**

## **Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie**

Praca doktorska Pana mgr. inż. Michała Rygały dotyczy niezwykle ważnego zagadnienia badawczego – optymalizacji materiałów, w szczególności niskowymiarowych struktur półprzewodnikowych stosowanych do detekcji promieniowania średniej podczerwieni. Wybrana metodyka badawcza – trzy różne techniki pomiarowe wraz z obliczeniami numerycznymi dają szeroki pogląd na właściwości badanych materiałów i mogą stanowić cenna wskazówkę dla badaczy zajmujących się osadzaniem kwantowych struktur półprzewodnikowych. Doceniam nie tylko duże znaczenie praktyczne prowadzonych prac badawczych, ale przede wszystkim ich wysoką jakość naukową. Wiele uzyskanych przez Autora rezultatów jest nowych, co zostało potwierdzone publikacjami, które ukazały się w dobrych czasopismach naukowych. Biorąc pod uwagę oryginalność zastosowanego podejścia eksperymentalnego wnioskuję o wyróżnienie doktoratu.