

Warszawa, 4 stycznia 2024

Izabella Grzegory
Instytut Wysokich Ciśnień PAN
01-142 Warszawa
ul Sokołowska 29/37

Rada Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

**Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr Wojciecha Mieczysława Linharta pt
*Badania nad własnościami optoelektronicznymi półprzewodników z grupy III-V
rozrzedzonych bizmutem i azotem***

Recenzowana rozprawa, w szczególności zaprezentowane w niej osiągnięcie naukowe dotyczy materiałów półprzewodnikowych grupy III-V, w których modyfikuje się podstawowe własności fizyczne takie jak przerwa energetyczna, czy stała sieci, poprzez domieszkowanie (rozrzedzenie) ich izoelektronowymi z podsięcią V, atomami azotu i/lub bizmutu.

Formalna ocena dorobku Kandydata

Pan doktor Wojciech Linhart jest młodym pracownikiem naukowym o ciekawym przebiegu kariery zawodowej w szczególności, studia doktoranckie odbywał na Uniwersytecie Wrocławskim, a także na Uniwersytecie Warwick (Wielka Brytania), gdzie również odbywał staż naukowy (3 lata), kontynuowany później jako staż podoktorski na Uniwersytecie w Liverpoolu. Pan dr Linhart jest współautorem 41 publikacji cytowanych ponad 1100 razy, co skutkuje wysoką, średnią ilością cytowań na pracę: 25. Indeks Hirscha Kandydata, to 20 (Web of Science), co na tym etapie kariery naukowej jest bardzo dobrym wskaźnikiem charakteryzującym większość wnioskodawców projektów ERC Consolidators Grants. Artykuły naukowe, których współautorem jest Habilitant, opublikowane są w periodykach o wysokiej (jak Journal of Applied Physics, Journal of Physics D: Applied Physics, Applied Physics Letters, Applied Physics Express, Journal of Crystal Growth oraz Semiconductor Science and Technology) i bardzo wysokiej (np. Physical Review Letters) renomie określonej za pomocą wskaźników przyjętych przez międzynarodowe środowiska naukowe. Dorobek naukowy jest udokumentowany również poprzez interesujący zestaw wykładów i seminariów na zaproszenie konferencji oraz instytucji naukowych.

Kandydat wykazuje dużą samodzielność badawczą, o czym świadczą wysokiej klasy publikacje z ośrodków brytyjskich i polskich z często wiodącą pozycją na liście autorów, a także zbudowana sieć współpracy zagranicznej udokumentowana w większości przypadków, wspólnymi publikacjami. O tej

samodzielności świadczy również lista projektów naukowych, w których Kandydat pełnił funkcję kierownika (2 pozycje) oraz wykonawcy.

Na szczególne uznanie zasługuje dorobek Kandydata w zakresie badania własności elektronowych azotku indu (InN) zwieńczony publikacją w Physical Review Letters w 2012 roku (pierwszy autor) oraz szeregiem wykładów na ważnych konferencjach naukowych: EMRS Spring Meeting Strasbourg 2010 Nicea 2011, IWN 2010 Tampa US, IWN Sapporo 2012, Wrocław 2014.

Od 2017 roku, Pan dr Linhart prowadzi zajęcia dydaktyczne na Politechnice Wrocławskiej, w językach polskim i angielskim. Opis tej działalności jest ciekawy i przekonujący.

Jako podstawę habilitacji, Kandydat przedstawił cykl 13 prac wieloautorskich opublikowanych w latach 2013 – 2020. W siedmiu z tych prac Pan Linhart jest pierwszym i/lub korespondencyjnym autorem, co wskazuje na jego wiodącą rolę w osiąganiu opisywanych wyników naukowych. Dwie z tych prac (**H4** i **H5**) są dobrze cytowane przez innych autorów: 79 i 62, odpowiednio wg Web of Science na dzień recenzowania.

Ocena osiągnięcia naukowego: *Badania nad własnościami optoelektronicznymi półprzewodników z grupy III-V rozrzedzonych bizmutem i azotem*

Przedstawione do oceny publikacje opisane w Autoreferacie są spójnym cyklem prac dotyczących szczegółowych badań własności optycznych ciekawej klasy materiałów półprzewodnikowych o dużym potencjale aplikacyjnym. Omawiane badania obejmują zarówno pomiary spektroskopowe jak i modelowanie zwłaszcza metoda k_p, a także oryginalną interpretację otrzymanych wyników. Wyniki tej rozprawy są na pewno ważne i przydatne dla inżynierii struktury pasmowej potrójnych i poczwórnych kryształów półprzewodnikowych.

Istotną wartość dodaną stanowił dostęp Habilitanta do wysokiej jakości kryształów wytwarzanych metodą MBE na uniwersytetach brytyjskich, amerykańskich i francuskich w szczególności na Uniwersytecie Warwick, gdzie pan dr Linhart odbywał staż naukowy. Jak wiadomo, jakość i czystość badanych materiałów ma podstawowe znaczenie dla prawidłowego określenia ich własności fizycznych. Ważnym przykładem ilustrującym ten warunek jest InN, dla którego określenie przerwy energetycznej (0.65eV, w stosunku do wcześniej powszechnie raportowanej wartości 1.95eV!) stało się możliwe dopiero po uzyskaniu warstw epitaksjalnych o wystarczającej jakości strukturalnej i czystości.

GaN_xSb_{1-x}

W pracy **H1** (20 cytowań), z wiodącym udziałem Autora, zaproponowany został nowy model opisu ewolucji struktury pasmowej GaSb w funkcji zawartości azotu. Wykazano istotny wpływ na kształt pasm energetycznych, a co za tym idzie, na kształt i położenie widm absorpcji optycznej, stanów generowanych przez pary atomów azotu w otoczeniu atomu galu w sieci krystalicznej GaSb, dla wysokich koncentracji azotu. Elegancką kontynuację tych badań stanowi praca **H2** (pierwszy autor), gdzie za pomocą modelu z pracy **H1** wyjaśniono różnice w zależności temperaturowej przerwy energetycznej w GaNSb i GaNAs.

InN_xSb_{1-x}

Trzecia praca **H3** (pierwszy autor, 8 cytowań) dotyczy wpływu azotu w podsieci anionowej, na własności optyczne wąskoprzerwowego kryształu InSb. Potwierdzono istotną różnicę w ewolucji przerwy energetycznej w funkcji koncentracji azotu, w InNSb w porównaniu do GaNSb spowodowaną znacznie mniejszym wpływem par atomów azotu na kształt i położenie pasm energetycznych kryształu

mieszanego. Obserwacje eksperymentalne zostały zinterpretowane poprzez modelowanie teoretyczne metodą k·p oraz obliczenia metodą DFT.

Ze Wstępu do pracy **H3** wynika, że zbadanie ewolucji przerwy energetycznej w InNSb oraz wyznaczenie parametrów 2-poziomowego modelu BAC miało miejsce po raz pierwszy, co jest cenne. W tym kontekście, dziwi mała ilość cytowań tej pracy.

Uwaga techniczna: W pracy **H3** wartość siły sprzężenia elementów macierzy BAC wynosi 1.8eV podczas gdy w Autoreferacie 180meV.

GaSb_xBi_{1-x}

Praca **H4** (liczba cytowań: 79) dotyczy wzrostu i charakteryzacji warstw GaSbBi o zawartości bizmutu do 5%. W wyniku pomiarów rentgenowskich, w odróżnieniu od wcześniejszych doniesień stwierdzono, że obecność Bi w sieci krystalicznej GaSb powoduje zwiększenie stałej sieci kryształu. Pomiar absorpcji wykazały zmniejszanie się przerwy energetycznej w funkcji zawartości bizmutu. Symulacja tego zachowania w modelu niekrzyżujących się pasm walencyjnych (VBAC) potwierdziła i pozwoliła zinterpretować wyniki eksperymentów. Zwrócono uwagę na ogromną czułość badanego układu na zmiany stałej sieciowej w postaci silnej reakcji przerwy energetycznej na niewielkie nawet, zmiany stałej sieci kryształu (210 meV na 0.01Å).

W pracy **H5** zaproponowano sposób regulowania zawartości bizmutu w warstwach GaSbBi poprzez zmianę prędkości wzrostu kryształu. W szczególności, otrzymano warstwy o wysokiej zawartości bizmutu, 9.6%, co należy do rzadkości. Rolą Habilitanta w tej również dobrze cytowanej pracy (>60), było przeprowadzenie stosownych pomiarów optycznych, wykonanie obliczeń oraz interpretacja wyników. W pracy otrzymano szereg ważnych rezultatów potwierdzających prawidłowość użycia modelu VBAC również dla warstw o wysokiej zawartości bizmutu.

W pracy **H6** zastosowano alternatywny sposób wprowadzania bizmutu do sieci GaSb – poprzez zmianę strumienia bizmutu w procesie wzrostu metoda MBE. Rola Habilitanta była podobna jak we wcześniej omawianych pracach.

InSb_xBi_{1-x}

Ewolucja przerwy energetycznej w InSbBi w funkcji koncentracji bizmutu była badana w pracy **H7**. Tu również określona została szybkość zmniejszania się przerwy energetycznej oraz wyznaczono parametry modelu VBAC wskazując na ich użyteczność do badania związków czteroskładnikowych.

Autorzy pracy zademonstrowali potencjał badanych materiałów dla zastosowań telekomunikacyjnych aczkolwiek wskazali na konieczność poprawy jakości warstw epitaksjalnych.

GaAsNBi

Naturalną niejako, kolejną rzeczą, zakres badań prowadzonych przez Habilitanta został rozszerzony na związki czteroskładnikowe w szczególności GaAs zawierający azot ($x < \text{at.}2.3\%$) oraz bizmut ($y < \text{at.}5.6\%$). Praca **H8** jest poświęcona szczegółowej analizie eksperymentalnej i teoretycznej zależności temperaturowej przerwy energetycznej w badanym kryształ w zależności od jego składu i niedopasowania sieciowego do podłoża GaAs. Badany układ jest tym bardziej interesujący, że dodatek N i Bi do kryształu GaAs pozwala na inżynierię przerwy energetycznej przy zachowaniu, w szczególnych przypadkach, dopasowania sieciowego. Pierwszym autorem pracy **H8** był student fizyki Politechniki Wrocławskiej wykonujący swoje badania naukowe pod kierunkiem Habilitanta.

InNASb

Wyniki badań własności optycznych warstw epitaksjalnych InAs zawierających antymon i azot w różnych stężeniach, zostały opisane w pracy **H9**. Poprzez systematyczne pomiary fotoluminescencji,

fotoodbicia, a także anihilacji pozytonów określony został wpływ azotu i antymonu na proces wzrostu warstw metoda epitaksji z wiązek molekularnych, a co za tym idzie na jakość optyczną otrzymywanych kryształów mieszanych. Pokazano pozytywną rolę antymonu w procesach powierzchniowych podczas krystalizacji warstw, a także złożony i z pozoru niejednoznaczny wpływ azotu na natężenie i szerokość widm fotoluminescencji. Komplementarne pomiary anihilacji pozytonów pozwoliły włączyć do interpretacji procesy tworzenia wakansów w sieci krystalicznej, co wraz z ewolucją struktury pasmowej pod wpływem azotu wynikającą z pomiarów i modelowania doprowadziło do interesującego i spójnego wyjaśnienia zmian charakteru widm optycznych w zależności od składu warstw.

Ga(In)SbBi

W tej grupie materiałów, zarówno dodatek indu jak i bizmutu do kryształu GaSb powoduje zmniejszenie przerwy energetycznej przy jednoczesnym wzroście stałej sieci. W pracy **H10** (pierwszy autor) analizowany jest wpływ atomów In i Bi na procesy fotoluminescencji w GaSb. W szczególności wskazany jest korzystny wpływ indu na intensywność fotoluminescencji z badanych kryształów. Jest to interesująca analogia do układów półprzewodników azotkowych, gdzie dodatek indu do GaN otworzył drogę do wydajnych diód LED.

Opis tej interesującej pracy w polskiej wersji Autoreferatu czyta się wyjątkowo niekomfortowo z uwagi na nieskorygowany tekst automatycznego tłumaczenia z języka angielskiego.

Struktury kwantowe

Prace **H11** i **H12** włączone do recenzowanego osiągnięcia dotyczą szczegółowej analizy własności optycznych struktur półprzewodnikowych opartych o związki III-V rozrzedzone bizmutem. Badane były studnie kwantowe GaAsBi/GaAs (**H11**) i GaSbBi/GaSb (**H12**). Wysoce profesjonalnie przeprowadzone i zinterpretowane pomiary fotoluminescencji (PL), czasowo rozdzielczej PL oraz fotoodbicia pozwoliły wykazać istotne różnice między badanymi układami dotyczące ich cech mikrostrukturalnych wynikających z odmiennego wpływu Bi zastępującego As (silne niedopasowanie) i Sb (regularny stop) w podsieci anionowej kryształów III-V.

Praca przeglądowa

Oryginalny wkład Habilitanta do badań własności optycznych związków III-V rozrzedzonych bizmutem jest dobrze widoczny w dołączonej do habilitacji pracy przeglądowej (Topical Review) **H13**: W Linhart and R. Kudrawiec, *Temperature dependence of bandgaps in dilute bismides*, *Semicond. Sci. and Tech.* 33, 073001 (2018). Praca zawiera 69 odnośników literaturowych, z czego w 13 pan dr Linhart partycypował jako współautor.

Reasumując, z przedstawionego do recenzji materiału w szczególności Autoreferatu i załączonych publikacji, jednoznacznie wynika, że Habilitant jest wysokiej klasy specjalistą w dziedzinie spektroskopii optycznej materiałów półprzewodnikowych obejmującej szeroki zakres metod eksperymentalnych oraz interpretacji wyników pomiarów na podstawie teoretycznego modelowania struktury pasmowej badanych układów.

Zaprezentowane w rozprawie wyniki badań stanowią oryginalny wkład w zrozumienie własności fizycznych ważnej klasy materiałów półprzewodnikowych o wysokim potencjale aplikacyjnym.

Uwagi redakcyjne do polskiej wersji Autoreferatu

1. Autoreferat, str 8: „Wyniki widm absorpcji...zostały przeanalizowane oraz obliczone” – niezręczne sformułowanie
2. Str. 11: „...obliczono widma absorpcji w funkcji temperatury w celu poprawności stosowanego modelu.” – pewnie: weryfikacji lub wykazania poprawności

3. Str. 12 W pracy H3 wartość siły sprzężenia elementów macierzy BAC wynosi 1.8eV podczas gdy w Autoreferacie 180meV
4. Str. 14 – „W artykule (H6) zaprezentowano sposób...poprzez zmianę tempa implantacji Bi przy ustalonej szybkości wzrostu” – użycie terminu „implantacja” sugeruje implantację jonowa podczas gdy chodzi tu o zmianę strumienia Bi podczas wzrostu metodą MBE.
5. Str. 16 „...określono mapę zależności składu i niedopasowania sieciowego od przerwy energetycznej...” – wydaje się, że to raczej przerwa energetyczna jest funkcją składu i naprężenia w kryształach.
6. Str. 17 i dalej: nie ma słowa: „epiwarstwa”
7. Str 18: ...eksycyony stają się wolne....i współistnieją z wolnymi nośnikami.” Nieoptymalne tłumaczenie z angielskiego. W wielu miejscach polskiej wersji Autoreferatu występuje ten mankament.

Podsumowanie

Podsumowując, stwierdzam że recenzowana rozprawa habilitacyjna dra Wojciecha Linharta spełnia w sposób wysoce zadowalający wymagania związane z uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego. W związku z tym zgodnie z Art. 219 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dziennik Ustaw 2018 poz. 1668), ze zmianami (Dziennik Ustaw 2023 poz. 212), wnioskuję do Rady Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie dr Wojciecha Linharta do dalszego postępowania kwalifikacyjnego w celu nadania stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Izabella Grzegory