

Prof. dr. hab. Detlef Hommel
Polski Ośrodek Rozwoju Technologii PORT
Sieć Łukasiewicza
Stabłowicka 147
54-066 Wrocław

01.03.2021

Recenzja pracy habilitacyjnej pana dr. Wojciecha Linharta:

***„Badania nad własnościami optoelektronicznymi półprzewodników z grupy III-V
rozrzedzanych bizmutem i azotem”***

Pan dr. Wojciech Linhart pracuje obecnie w Katedrze Inżynierii Materiałów Półprzewodnikowych (zespół profesora R. Kudrawca) na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki na Politechnice Wrocławskiej. Studiował fizykę na Uniwersytecie Wrocławskim i w roku 2007 dostał tytuł magistra w dziedzinie fizyki. Pierwsze dwa lata studiów doktoranckich robił na Wydziale Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Wrocławskiego (2007-2009) a potem kontynuował na Uniwersytecie Warwick (UK), gdzie w roku 2012 dostał tytuł ‘Doctor of Philosophy in Physics’, co odpowiada stopnia doktora nauk fizycznych. Od 2012 do 2014 roku pan dr. Linhart odbywał staż podoktorski na Uniwersytecie w Liverpool (UK). Od 2014 roku pracuje na Politechnice Wrocławskiej najpierw jako asystent a potem jako adiunkt.

Dr. Wojciech Linhart ma pokaźną ilość publikacji naukowych a jako temat rozprawy habilitacyjnej wybrał badania optyczne półprzewodników III-V rozrzedzanych bizmutem i azotem. Omówiono 13 prac z lat 2013 – 2020, tzn. częściowo nieco starsze, ale tematycznie spójne. W nich 6 razy jest albo pierwszym autorem albo autorem równorzędnym do pierwszego a 6 razy drugim autorem. Tematycznie zajmował się charakteryzacją optoelektrycznym struktur półprzewodnikowych hodowanych na różnych uniwersytetach w UK (m. i. Warwick, Liverpool, Sheffield), USA i Niemczech metodą molecular beam epitaxy (MBE). Średnia liczba cytowań tych prac to 30, przy czym głównie starsze publikacje związane z uniwersytetem w Warwick (M.K. Rajpalke) jak H4 (102), H5 (77) i H7 (62) wybijają się. Uśredniony Impact Factor tych publikacji jest 3,0 a najlepsze nie przekraczają 4,0. Wydaje się to na pierwszy rzut oka dość mały. Brakuje ‘przełomowych’ prac w żurnalach o IF > 7. Jednak tu trzeba brać pod uwagę, że chodzi o nowe materiały bardzo trudne do hodowania ze względu na niedopasowania sieciowe itd. Mając to na uwadze czasopisma są dobrze wybrane i adresowane do zainteresowanych w tym grup badawczych. Tematycznie prace te są spójnie i bardzo dobrze opisane.

Rozprawa habilitacyjna i wybrane publikacje grupują się wokół czterech bardzo ciekawych, ale doświadczalnie trudnych, zagadnień szczególnie jeśli chodzi o wzrost epitaksjalny takich silnie nie dopasowanych struktur. Te tzw. ‘Highly Mismatched Alloys’ (HMA’s) charakteryzują się dużą różnicę

promieni atomowych, elektryczności i często struktury krystalicznej. Tworzenie jednorodnych trój- lub cztero-składnikowych heterostruktur jest więc ograniczona do małych składów a często jakość krystaliczna jest słaba z punktu zastosowań. Ich własności optyczne często nie są znane a istniejące modele teoretyczne o ograniczonej wartości. Dlatego badania optoelektroniczne przeprowadzone przez pana dr. Linharta stanowiły ważny wkład w lepszym rozumieniu tych materiałów.

1. Związki III-V rozrzedzane azotem a tu w szczególności antimonki galu ($\text{GaSb}_{1-x}\text{N}_x$) i indu ($\text{InSb}_{1-x}\text{N}_x$)
2. Związki III-V rozrzedzane bizmutem a tu w szczególności antimonki galu ($\text{GaSb}_{1-x}\text{Bi}_x$) i indu ($\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x$)
3. Czteroskładnikowe kombinacje GaAsNBi, InAsNSb oraz GaInSbBi.
4. Struktury kwantowe GaAsBi i GaSbBi.
5. Do tego dochodzi w publikacji H13 krótki opis temperaturowej zależności przerwy energetycznej rozrzedzanych bizmutów.

Trochę irytujące tu jest niespójność w opisie składów tych materiałów. Co prawda to występuje też w tytułach artykułów H1 - H13 ale można by to było ujednoczyć w opisie habilitacyjnym. Tylko przykład z H1: GaNSb sugeruje, że chodzi o azotek galu z małą ilością antymonu, ale jest odwrotnie. W H4 natomiast dobrze jest napisane GaSbBi, bo chodzi o dodanie małych ilości bizmutu do GaSb. Widać, że pan dr Linhart nie zajmuje się epitaksją tych związków ale ich charakterizacją.

Prace **H1 – H2** zajmują się trójskładnikowym antimonkiem galu (GaSb) z małą ilością azotu ($\text{GaSb}_{1-x}\text{N}_x$). W **H1** opisane jest wpływ stanów energetycznych par azotowych. Wzrost składu N powoduje przesunięcie się krawędzi absorpcji ku niższym energii. Proponowano nowy 3-poziomowy model niekrzyżujących się pasm, aby te wyniki tłumaczyć. Pokazano, że oprócz zlokalizowanych stanów azotowych w sieci GaSb ważną rolę odgrywają stany pochodzące od par N-N, co wpływa na dyspersję pasma przewodnictwa. Dane uzyskane za pomocą pomiarów absorpcyjnych potwierdzają proponowany model 3-poziomowy BAC (band anticrossing). Następnie badano wpływ tych stanów na zależność temperaturową przerwy energetycznej, co opisane jest w **H2**. Twierdzono, że ze wzrostem koncentracji azotu zależność temperaturowa przerwy staje się silniejsza. Jest to następne potwierdzenie zarówno roli tych par azotowych jak i słuźności 3-poziomowego modelu BAC. Podsumując wyniki uzyskane dla GaSbN są spójne i dobrze się uzupełniają.

Publikacja **H3** zajmuje się antimonkiem indu rozrzedzane azotem ($\text{InSb}_{1-x}\text{N}_x$). Przerwa energetyczna InSb wynosi zaledwie 174 meV i jest najmniejsza wśród klasycznych półprzewodników III-V. Osiągnięte koncentracje azotu wynosiły tylko 1,13%, co jeszcze raz potwierdza trudności technologiczne wspomniane już przy hodowania warstw takich HMA's. Wbudowanie się azotu do sieci InSb nawet w tak małych koncentracjach wprowadza do silnego zmniejszenia przerwy

energetycznej do 85 meV. Pozwala to zasadniczo budować źródła i detektory w obszarze 8-14 μm . Widma absorpcyjne dało się dobrze modelować 2-poziomowym modelem BAC.

Następnie omówione są wyniki dla związków III-V rozrzedzane bizmutem.

Wbudowanie Bi do sieci $\text{GaSb}_{1-x}\text{Bi}_x$ na miejscu anionów doprowadza też do zmniejszenie się przerwy energetycznej. Tu zmiany są głównie w pasmie walencyjnym (valence band anticrossing VBAC). Jest to opisane w pracach **H4-6**. Jak pokazano w **H4** bizmut dało się budować do sieci GaSb do 5% przy bardzo dobrej jakości tych warstw. Przy pomocy spektroskopii absorpcyjnej stwierdzona redukcja przerwy energetycznej dała się dobrze opisać modelem VBAC niekrzyżujących się pasm. Kontrola wbudowania się bizmutu poprzez temperaturę wzrostu jest opisana w **H5**. Osiągnięto koncentracji Bi aż do 9,6%. Badania XRD i RBS potwierdziły to jak i wzrost stały sieci epiwarstw w porównaniu do podłoża GaSb. Opisując publikację **H6** pan dr Linhart mylnie opisze proces technologiczny używany do zmiany koncentracji Bi w warstwach GaSbBi. Z pracy wynika, że zmieniono beam equivalent pressure (BEP) bizmutu utrzymując temperaturę podłoża i inne parametry wzrostu stałe. Używanie określenie „*tempa implantacji Bi*” wskazuje na to, że pan dr. Linhart się co prawda bardzo dobrze zna na metodach charakteryzacji optycznej, ale nie starał się rozumieć głębiej metody MBE, z których warstwach i struktur korzystał. W opisie habilitacyjnym nie powinno się to zdarzyć.

Wyniki dla warstw $\text{InSb}_{1-x}\text{Bi}_x$ omówione są w publikacji **H7**. Jakościowo te próbki uzyskane też metodą MBE nie miały tej jakości krystalicznej co GaSbBi, opisane wcześniej. Badania optyczne też wykazały zmniejszenie się przerwy energetycznej ze zwiększeniem budowanych atomów Bi. Energetyczny poziom związanych z atomami bizmutu jest ulokowane blisko pasma walencyjnego. Prowadza to do rozszczepienia pasma VB na podpasma.

Czteroskładnikowe warstwy GaAsNBi, InAsNSb i GaInSbBi omawiane są w publikacjach **H8-10**. Materiały takie są bardzo ciekawe i mało badane.

W przypadku **GaAsNBi (H8)** uzyskane koncentracje wynosiły N < 2,3% a Bi < 5,6%. Pomiarzy foto-odbicia w zakresie temperaturowym 20 – 300 K służyły do wyznaczenia przerwy energetycznej i jej zmian. Tu też obserwowano redukcję przerwy ze wzrostem zawartości N i Bi. Wyniki doświadczalne porównano z obliczeniami rozszerzonego modelu BAC zakładając oddziaływanie pasma przewodnictwa GaAs z lokalizowanymi stanami azotu oraz pasma walencyjnego GaAs ze stanami od atomu Bi.

Wyniki dla **InAsNBi** są dyskutowane w **H9**. Jako metody charakteryzacji używano luminescencji, foto-odbicie oraz anihilację pozytronów. Te ostatnie pokazały, że wbudowanie się antymonu silnie wpływa na powstanie stanów defektowych i wakakancji. Jednoznacznych wyników

na wpływ atomów azotu nie dało się twierdzić oprócz tego, że wbudowanie się azotu silnie degradowuje zarówno strukturalną jak i optyczną jakość warstw badanych.

GaInSbBi był następnym badanym materiałem czteroskładnikowym. W innej publikacji pana Linharta, nie wchodząca do składu habilitacji, pokazano, że te materiały charakteryzują się silną luminescencją. W pracy **H10** przedstawiono wyniki wskazujące na wpływ atomów In i Bi na to świecenie. Pomiar PL w niskich temperaturach wskazuje na rekombinację donor – akceptor. Większość ekscytonów jest lokalizowanych a swobodne są wychwytywane przez lokalne fluktuacje potencjałów pochodzących od atomów In i Bi. To się zmienia drastycznie w wyższych temperaturach a w konsekwencji ekscytony mogą dojść do defektów / centrów rekombinacji niepromienistej. W konsekwencji intensywność luminescencji drastycznie spada.

Czwarty temat tej habilitacji zajmuje się studniami kwantowymi.

W pracy **H11** przedstawione są wyniki dla studni **GaAs_{1-x}Bi_x** w barierach **GaAs**. Próbki były hodowane na uniwersytecie w Sheffield metodą MBE. Struktury badano metodami foto-odbicia i luminescencji. Twierdzono silne efekty lokalizacyjne poniżej 150 K. W wyższych temperaturach stany zdelokalizowane dominują emisje. Pozwoliło to twierdzić, że te struktury kwantowe są typu I.

Studnie kwantowe **GaSb_{1-x}Bi_x/GaSb** są opisane w **H12**. Do ich charakteryzacji używano metody fotoluminescencji, czasowo rozdzielczej luminescencji oraz odbicia. W niskich temperaturach dominuje rekombinacja ekscytonów będących słabo lokalizowanych na istniejących fluktuacjach. Jest to różnica do większości materiałów HMA's.

Publikacja **H13** podsumuje badania temperaturowej zależności związków z bizmutem. Obejmuje ona wyniki dla **GaAsBi**, **GaSbBi**, **InSbBi**, **InAsBi**, **InGaBiAs**, **GaInSbBi**, **GaAlSbBi** oraz studni kwantowych **GaAsBi/GaAs**. Stanowi ona ważny wkład do wiedzy o tych materiałach. Te zmiany w funkcji temperatury są zasadniczo takie same jak dla ich macierzystych materiałów.

Podsumując można twierdzić, że badania pana doktora Wojciecha Linharta stanowią ważny, samodzielny wkład do lepszego rozumienia tych materiałów omówionych w ramach tej habilitacji. Bazują one zarówno na zastosowaniu metod optycznych jak i rzetelnego modelowania teoretycznego. Materiały III-V rozrzedzane azotem i bizmutem są ważne nie tylko z punktu widzenia fizyki, ale i inżynierii materiałowej. Do ich przyszłego szerokiego zastosowania w emiterach i detektorach w głębokiej podczerwieni jest jeszcze daleko, ale jego badania przynosiły się do lepszego rozeznania tych związków półprzewodnikowych. Dlatego, mimo drobnych krytycznych uwag, uważam, że całokształt jak najbardziej nadaje się do habilitacji.

Pan dr Wojciech Linhart spędził trzy lata (2009 – 2012) na Uniwersytecie Warwick (UK) w ramach europejskiego projektu RAINBOW. Jednym z wyników naukowych tego to 7 publikacji w

czasopismach międzynarodowych. Następne dwa lata odbył staż podoktorski na Uniwersytecie w Liverpool (UK). Z tego okresu pochodzi 15 publikacji. Dodatkowo odbył też kilka krótkich staży zagranicą. Posiada on szeroką współpracę z ośrodkami zagranicznymi. Świadczy to o jego otwartości i uznania w zagranicznych ośrodkach badawczych.

Jego działalność dydaktyczna też jest dobrze dokumentowana i nie wymaga dalszych komentarzy. Pan dr Linhart jest od 2022 MC member europejskiej akcji COST i od 2021 roku członkiem Rady Wydziału Podstawowych Problemów Techniki na Politechnice Wrocławskiej.

Wniosuję więc, że pan doktor Wojciech Linhart kwalifikuje się swoimi osiągnięciami naukowymi, złożoną rozprawę habilitacyjną i całokształtem naukowym do tytułu doktora habilitowanego. Liczba publikacji wynosiła w momencie składania rozprawy habilitacyjnej 41 a indeks Hirsch 18.

Stanowi to podstawę do twierdzenia, że powierzona mi do recenzji rozprawa habilitacyjna spełnia w całej rozciągłości wymogi stawiane rozprawom habilitacyjnym zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. W związku z tym wniosuję do Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie pana doktora Wojciecha Linharta rozprawy pod tytułem:

***„Badania nad własnościami optoelektronicznymi półprzewodników z grupy III-V
rozrzedzanych bizmutem i azotem”***

do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

prof. dr hab. Detlef Hommel