

dr hab. Grzegorz Cywiński, prof. IWC PAN
Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk
ul. Sokołowska 29/37
01-142 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Tristana Smółki pt. **“Optyczne właściwości półprzewodnikowych układów niskowymiarowych przeznaczonych do zastosowań w emiterach promieniowania z zakresu średniej podczerwieni”**.

Rozprawa doktorska została wykonana na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem dra hab. inż. Marcina Motyka.

Praca mgr inż. Tristana Smółki składa się z sześciu rozdziałów zatytułowanych kolejno: *Wprowadzenie*, *Związki półprzewodnikowe – teoria*, *Materiały silnie niedopasowane sieciowo*, *Techniki pomiarowe*, *Otrzymane wyniki i analiza danych* oraz ostatniego rozdziału *Podsumowanie*. W tematyce rozprawy zostały opublikowane trzy prace, w którym autor rozprawy jest pierwszym autorem:

1. Tristan Smółka, Michał D. Rygała, Krzysztof Ryczko, Andreas Bader, Fabian Hartmann, Borislav Petrovic, Sven Höfling, Marcin Motyka

“Carrier dynamics of type-II InAsSb/GaAsSb W-quantum wells emitting in mid-infrared”

Light-Emitting Devices, Materials, and Applications XXVIII / eds. Jong Kyu Kim, Michael R. Krames, Martin Strassburg. SPIE Proceedings Series, 2024, vol. 12906, pp. 1-6

2. Tristan Smółka, Michał Rygała, Joonas Hilska, Janne Puustinen, Eero Koivusalo, Mircea Guina, Marcin Motyka

“Influence of bismuth content on optical properties and photoluminescence decay time in GaSbBi films”

ACS Omega, 2023, vol. 8, no. 39, pp. 36355-36360

3. Tristan Smółka, Marcin Motyka, Vyacheslav Vital'evich Romanov, Konstantin Dmitrievich Moiseev

“Photoluminescence spectroscopy of the InAsSb-based p-i-n heterostructure”

Materials, 2022, vol. 15, no. 4, art. 1419, pp. 1-11

W pierwszym rozdziale zatytułowanym *Wprowadzenie* autor krótko opisuje motywację i zasady optycznego wykrywania gazów, w szczególności przedstawia tu znaczenie zakresu średniej podczerwieni dla optycznej detekcji absorpcyjnej. W drugiej części rozdziału zostały określone cele badawcze w ramach, których optyczne badania w średniej podczerwieni nowych materiałów półprzewodnikowych przyczynią się do ich późniejszych zastosowań w aktywnych obszarach emiterów na ww. zakres do detekcji gazów. Zostały też wypunktowane cztery zadania badawcze, w których różne półprzewodnikowe materiały/struktury charakteryzowane były poprzez widma fotoluminescencji, fotoodbicia oraz charakterystycznych czasów zaników widm absorpcji przejściowej.

W drugim rozdziale zatytułowanym *Związki półprzewodnikowe - teoria* autor krótko przedstawia wybrane zagadnienia fizyki ciała stałego, w szczególności podstawy fizyki półprzewodników

objętościowych oraz heterostruktur półprzewodnikowych. Wprowadzone zostały na początku podstawowe pojęcia takie jak pasma walencyjne i przewodnictwa, przerwa energetyczna, a następnie zwięźle przedstawione zostały półprzewodniki objętościowe w przybliżeniu masy efektywnej, twierdzenie Blocha oraz struktura pasma walencyjnego i pojęcie rozszczepienia spin-orbita. Kolejnym zagadnieniem krótko opisanym są heterostruktury półprzewodnikowe oraz typy nieciągłości pasm. Te elementarne z punktu widzenia fizyki ciała stałego oraz fizyki półprzewodników, które zwykle są szeroko opisywane w podręcznikach, są przez autora przedstawione bardzo zwięźle i prawdopodobnie mogą być zrozumiane przez czytelnika z bazową wiedzą na ten temat. Te części są przedstawione poprawnie, chociaż duża skrótość oraz parę uchybień edytorskich lub językowych może powodować problemy ze zrozumieniem przez potencjalnego czytelnika. Ponieważ jednak rozprawa doktorska jest w języku polskim, to większa staranność w tym względzie mogłaby znacząco poprawić przystępność tu zaprezentowanego materiału, bez konieczności sięgania do szerszych opracowań. Przykładem nieprecyzyjnego języka są używane w rozprawie „heterostruktury półprzewodnikowe”, które w ogólności są dosyć pojemnym sformułowaniem zawierającym wiele możliwych struktur, ale autor w rozprawie po bardzo krótkiej definicji, wydaje się ograniczać się jedynie do struktur dwuwymiarowych i epitaksjalnych. W drugiej części rozdziału autor następnie opisuje kwantowe ograniczenie (w tym studnie, druty i kropki kwantowe), które jest przedstawione w zależności od wymiarowości struktur tzn. kwantowego ograniczenia przestrzennego 3D, 2D, 1D oraz 0D, co ma swoje konsekwencje w odpowiedniej zależności gęstości stanów od energii. Ostatnią częścią rozdziału drugiego jest punkt 2.3 *Przejścia optyczne w heterostrukturach półprzewodnikowych* – wprowadzający podstawowe definicje przejść, ich prawdopodobieństwo, rodzaje oraz reguły wyboru. Kolejno autor wprowadza definicję ekscytynu w modelu Bohra, a następnie omawia efekty ekscytonowe oraz wpływ na nie głębokich i płytkich defektów. Podsumowaniem tej części jest opis wpływu tych typów defektów na własności optyczne materiałów półprzewodnikowych dla ich charakteryzacji oraz potencjalnego zastosowania w emiterach. Kolejna część odnosi się do podstaw działania laserów i ich znaczenia w spektroskopii. Następnie autor przedstawia krótko koncepcję laserów półprzewodnikowych i ich wykorzystanie w optycznej detekcji gazów w średniej podczerwieni oraz kolejno omawia analogicznie: kwantowe lasery kaskadowe i międzypasmowe lasery kaskadowe.

W rozdziale trzecim zatytułowanym *Materiały silnie niedopasowane sieciowo* autor odnosi się do materiałów rozcieńczonych na bazie GaAs z domieszką izoelektronowym atomem azotu lub bizmutu, które są materiałami stopowymi o silnym niedopasowaniu. W pierwszej części tego rozdziału opisane są stopy (np. GaAs czy GaSb) rozcieńczone azotem i bizmutem, które autor nazywa rozcieńczonymi azotkami oraz bizmutkami, odpowiednio. Opisany jest stan wiedzy oraz dlaczego tego typu rozcieńczone stopy są ważne dla średniej podczerwieni. Rozcieńczone azotki zasadniczo różnią się od rozcieńczonych bizmutków, gdyż azot wprowadza stany zlokalizowane w pobliżu (lub powyżej) krawędzi pasma przewodnictwa, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia przerwy energetycznej. Natomiast w przypadku bizmutu w rozcieńczonych bizmutkach, stany zlokalizowane są tworzone w okolicy pasma walencyjnego, co prowadzi do jego podniesienia i efektywnym zmniejszeniem przerwy energetycznej. W obu przypadkach takie materiały półprzewodnikowe, o odpowiednim składzie, wysokiej jakości optycznej i odpowiednio użyte do konkretnego zastosowania są niezwykle istotne dla emiterów i detektorów w zakresie średniej podczerwieni. W kolejnych częściach rozdziału autor opisuje model niekrzyżujących się pasm oraz krótko referuje właściwości optyczne, czyli przejścia optyczne i siły oscylatora w odniesieniu do stopów silnie niedopasowanych. Rozdział podsumowany został znaczeniem tych materiałów dla emiterów w zakresie średniej podczerwieni, gdzie w przypadku rozcieńczonych bizmutków zwiększenie rozszczepienia spin-orbita powoduje korzystne zmniejszenie efektywności procesów niepromienistych, co jest bardzo ważne dla struktur laserowych.

Kolejny **czwarty rozdział** opisuje techniki pomiarowe kolejno: spektroskopię Fouriera z użyciem spektrometru Bruker Vertex 80v, czasowo-rozdzielczą fotoluminescencję z zastosowaniem nadprzewodzącego detektora pojedynczych fotonów oraz absorbcję przejściową metodą pompa-sonda. Autor opisuje w kolejnych częściach zasadę działania, szczegóły aparaturowe poszczególnych metod, a także konkretne konfiguracje i metody pomiarowe. Opisy te są moim zdaniem wystarczające dla czytelnika zaznajomionego z tematyką i zapewne świadczą o zrozumieniu przez autora zagadnienia pomiarowego w średniej podczerwieni. Niemniej jednak zabrakło mi podkreślenia istotnego elementu dot. specyfiki eksperymentów w średniej podczerwieni, która otacza nas ze wszystkich stron. Chociaż autor napisał cyt. „Dzieje się tak, ponieważ niezależnie od tła (ciągłego widma w odbiciu absolutnym) mierzona jest tylko zmiana związana z pewnymi dyskretnymi zjawiskami” brakuje mi podkreślenia tego, że rejestrowany sygnał na detektorze składa się z dwóch składowych tzn. z ciągłego w czasie tła składającego się z promieniowania w podczerwieni z otaczających przedmiotów (głównie w temperaturze pokojowej, czyli z emisji termicznej dokładnie w tym zakresie widmowym) oraz sygnału zależnego głównie od czasu (w spektrometrze Fouriera przesuw zwierciadła, modulacja w fotoodbiciu, oraz wielokrotne uśrednianie rejestrowanej zmiany sygnału dla danej długości fali w spektroskopii absorpcji przejściowej). Rozdzielenie sygnału tła i zmiennej w czasie składowej to podstawa każdej z zaprezentowanych technik eksperymentalnych.

Piąty rozdział *Otrzymane wyniki i analiza danych* to główna część rozprawy podzielona tematycznie pod względem badanego zestawu próbek oraz użytych technik badawczych. Kolejne części rozdziału dotyczą poszczególnych części zatytułowanych: *Warstw GaSbBi, Warstw In(As)SbBi, Heterostruktur InAsSbP/InAsSb oraz Studni kwantowych typu drugiego. W pierwszej części dotyczy cyklu badań dwóch warstw epitaksjalnych o grubości 150 nm GaSbBi o koncentracjach bizmutu 5,8% oraz 8%,* odpowiednio. Wykonano serie pomiarów fotoluminescencji w funkcji temperatury od 4 K do 300 K oraz funkcji mocy wiązki pobudzającej. Określono wartości przerwy energetycznej w temperaturze 77 K dla obu próbek: 0,63 eV dla próbki zawierającej 5,8% Bi oraz 0,58 eV dla próbki z 8,0% Bi. Analiza ewolucji temperaturowej widm wykazała obecność stanów zlokalizowanych w pasmie wzbronionym. W dalszej analizie widm wyznaczono energie aktywacji poprzez dopasowanie danych równaniem Arrheniusa i pik luminescencji rozdzielono na niskoenergetyczną składową (przypisaną stanom defektowym) oraz składową wysokoenergetyczną (przypisaną rekombinacji ekscytonowej). Porównując w ten sposób widma obu próbek w temperaturze 4 K i 30 K zauważono większy wkład składowej niskoenergetycznej w warstwie o większej koncentracji bizmutu dla temperatury 30 K. Zauważalnie silniejsza emisja pochodząca ze zlokalizowanych nośników dla warstwy z większą koncentracją bizmutu została porównana z wnioskami z innych eksperymentów i przypisana klasteryzacji bizmutu w sieci krystalicznej, prowadzącej do mechanizmu pułapkowania nośników. W kolejnej części opisano badania fotoluminescencji w funkcji mocy wiązki pobudzającej dla dwóch temperatur 10 K i 30 K dla mocy od 100 mW do 400 mW. Dla pomiarów w 10 K zaobserwowano charakterystyczne dla stanów defektowych wysycenie sygnału, co świadczy, że emisja w tej temperaturze jest zdominowana przez efekt klasteryzacji bizmutu. W obu częściach zabrakło informacji na temat pobudzania tzn. linii lasera oraz jego modulacji (te informacje dostępne są w publikacji autora ACS Omega 2023, 8, 36355–36360), a w części dot. badań fotoluminescencji w funkcji mocy wiązki zabrakło informacji o gęstości mocy. Oczywiście bezpośredni pomiar gęstości mocy wiązki może być trudny, ale jakiegokolwiek oszacowanie byłoby bardzo istotne. Dodatkowo dosłowne tłumaczenie MBE na j. polski cyt. „epitaksji z wiązki molekularnej” str. 48 jest niepoprawne, natomiast na str. 59 autor użył poprawne sformułowanie „epitaksji z wiązek molekularnych”. W kolejnej części autor opisuje badania procesów dynamiki nośników ładunku, czyli określenie czasów zaniku emisji radiacyjnej fotoluminescencji w badanych warstwach przy użyciu metody fotoluminescencji czasowo-rozdzielczej. W badaniach zastosowano układ wykorzystujący nadprzewodzący detektor pojedynczych

fotonów, co umożliwiło przeprowadzenie badań w domenie czasowej w 4 K. Czas zaniku emisji uzyskany z takich widm analizowano jako składający się z czasu zaniku rekombinacji radiacyjnej oraz czasu zaniku rekombinacji nieradiacyjnej. Analiza widm wykazała znaczny wzrost czasu zaniku obserwowany w pobliżu energii emisji stanów defektowych. Dodatkowo czas zaniku rośnie wraz ze wzrostem zawartości bizmutu, co było zgodnie z wcześniejszymi badaniami.

Dru ga część rozdziału piątego opisuje badania właściwości optycznych dla przerwy energetycznej, jak i pasma rozszczepionego spin-orbita warstw o grubości 250 nm InSbBi oraz InAsSbBi, czyli badano trzy próbki InSb_{1-x}Bi_x o zawartościach Bi odpowiednio ok. 0,7%, 1,3% i 1,8%, oraz próbkę referencyjną z czystego InSb, a także cztery próbki InAsSbBi o stałej zawartości Bi (ok. 1,3%) i zmieniającym się udziale As (0,2–0,4%). Wyniki pomiarów widm foteoodbicia otrzymanego w temperaturze 10 K dla warstw InSbBi oraz InAsSbBi, wykazują dla InSbBi wyraźne przesunięcie maksimum związanego z przejściem podstawowym w stronę niższych energii wraz ze wzrostem zawartości Bi, natomiast w przypadku InAsSbBi widać, że próbki o tym samym udziale Bi (1,3%), ale różnym As (0,2–0,4%), mają zbliżone energie przejścia E_0 w okolicach 0,20 eV, nie zaobserwowano istotnego przesunięcia wraz ze wzrostem As. Dodatkowe pomiary foteoodbicia w bliskiej podczerwieni umożliwiły wyznaczenie przesunięcia energii dla wszystkich próbek, co pozwoliło na przeanalizowanie obserwowanego w widmach wpływu zawartości As i Bi na rozszczepienie spin-orbita. Autor uznał, że stosunkowo niewielka ilość arsenu nie powinna znacząco wpływać na wartość oddziaływania spin-orbita dlatego skonfrontował wyniki z obliczeniami wykonanymi tzw. metodą $8k \cdot p$ (notabene – metoda nie wyjaśniona ani nie ma stosownego odnośnika). Pozwoliło to zweryfikować wartość parametru zagięcia (ang. *bowing*) $C_{Bi} = 0,0240$, który znacznie lepiej opisywał uzyskane rezultaty z foteoodbicia E_g oraz Δ_{SO} . Ostatnimi badaniami w tej części były pomiary dynamiki nośników ładunku metodą pompa-sonda. Przeprowadzone pomiary oraz ich analiza doprowadziła do wniosku, że w zakresie zastosowanych składów bizmutu w warstwach InSbBi nie dochodzi do klasteryzacji Bi, jak to obserwowano dla GaSbBi. Natomiast w przypadku InAsSbBi w porównaniu do InSbBi zaobserwowano istotny wzrost czasu zaniku, który nie został jednoznacznie wyjaśniony i wymaga to dalszych badań warstw o szerszym zakresie składów As. Uzyskane dłuższe czasy życia nośników w InAsSbBi mogą okazać się atrakcyjne dla inżynierii procesów radiacyjnych w optoelektronice średniej podczerwieni.

Kolejna część rozdziału piątego (5.3) opisuje badania nad procesami radiacyjnymi (tzn. fotoluminescencji) oraz nieradiacyjnymi (typu Augera) heterostruktur InAsSbP/InAsSb oraz InSbP na podłożu InAs. Badania dotyczyły struktury typowej konstrukcji diody p-i-n umożliwiającej praktyczne zastosowanie do emisji 3-5 μm , gdzie aktywna część (tu InAs_{0,95}Sb_{0,05}) umieszczona jest pomiędzy barierami InAsSbP. Ta dosyć skomplikowana heterostruktura pozwala z jednej strony na wykonanie realnego przyrządu półprzewodnikowego poprzez inżynierię przerwy zabronionej poszczególnych warstw, ale z drugiej strony stanowi też duże wyzwanie technologiczne z powodu niedopasowania sieciowego, które wpływa nie tylko na wewnętrzne naprężenia struktury, ale już podczas wzrostu epitaksjalnego zmieniający się parametr sieci daje w rezultacie istotnie różniące się stopy materiałów barierowych. Na podstawie skanów dyfrakcji rentgenowskiej, autorzy pracy *Materials 2022, 15, 1419* (w tym autor rozprawy) stwierdzają, że 1 μm warstwa InAs_{0,95}Sb_{0,05} jest w pełni zrelaksowana, co moim zdaniem jest zbyt śmiałym stwierdzeniem bez przeprowadzenia bardziej zaawansowanych badań rentgenowskich w tym mapowania sieci odwrotnej i analizy stopnia relaksacji. Najczęstszym obrazkiem dla tego typu struktur, nawet w przypadku dosyć grubych warstw epitaksjalnych, jest częściowa relaksacja zależna od grubości samej warstwy. Analizując dalej stosunkowo złożony system warstw, z ich zestawem przerw zabronionych oraz zależności temperatury autor przedstawia widma luminescencji w funkcji temperatury w zakresie 10-300 K. Porównując z fotoluminescencją referencyjnej warstwy barierowej jedno z pasm z emisją $\sim 0,5$ eV można przypisać barierze. Zaobserwowana słaba intensywność niskoenergetycznego pasma $\sim 0,35$ eV w niskich temperaturach

(10-140 K) przypisano aktywnym procesom Augera oraz ograniczoną generacją fotonosników. Interesujący jest natomiast gwałtowny wzrost tej intensywności ze wzrostem temperatury w zakresie 160-300 K, co drobiazgowo jest analizowane biorąc pod uwagę szczegóły struktury i wskazuje na istnienie dodatkowych kanałów rekombinacji biorących udział w fotoluminescencji. Przedstawiony diagram fazowy struktury wraz z dyskutowanymi wpływem kanałów nieradiacyjnych typu Auger CHHS (ang. *conduction-heavy hole-heavy hole-spin-off band*), które dominują w niskich temperaturach, a dla temperatur powyżej 120 K zachodzi relacja $E_g < \Delta_{SO}$ co powoduje tłumienie procesu Auger i wraz z tym wzrasta prawdopodobieństwo nakładania się funkcji falowych elektronów i dziur. Dodatkowo autor przedstawia obliczoną energię pasma spin-orbita w funkcji składu Sb, która wykazuje na możliwość dalszego rozwoju heterostruktur opartych o InAsSb(P) w kierunku zwiększania długości fali emisji powyżej 3,5 μm .

Ostatnia część rozdziału piątego (5.4) opisuje studnie kwantowe typu drugiego na bazie InAsSb/GaAsSb emitujących w zakresie średniej podczerwieni. Specyfika struktur typu II polega przede wszystkim na lokalizacji dziur i elektronów w sąsiadujących warstwach, co powoduje, iż przejścia rekombinacyjne są bardzo czułe na jakość interfejsu pomiędzy nimi. W rozdziale przedstawiono badania w średniej podczerwieni (fotoluminescencji, fotoodbicia oraz zaniku fotoluminescencji), dla których parametrem odniesienia był jeden z parametrów technologicznych polegający na kilku sekundowym przedmuchu antymonem (ang. *antimony soak time*). Użyte przez autora sformułowanie „tzw. czasu nasiąkania (przedmuchu) atomów antymonu” wydaje się mylące, gdyż źródła antymonu używane w MBE (ang. *molecular beam epitaxy*) zwykle dostarczają strumień antymonu molekularnego, a nie atomowego jak pisze autor rozprawy. Proszę o wyjaśnienie tego stwierdzenia, gdyż nie udało mi się dotrzeć do technologicznych prac źródłowych dot. tego zagadnienia w tym konkretnym przypadku. W tym rozdziale zostały zebrane i przeanalizowane pomiary dla dwóch serii próbek nominalnie o identycznej strukturze wykonanych na podłożach GaSb AlSb/InAs_{0,8}Sb_{0,2}/GaAs_{0,2}Sb_{0,8}/InAs_{0,8}Sb_{0,2}/AlSb i opisanych w rozprawie grubościami oraz o odpowiednio czasach nasiąkania: dla pierwszej serii – 2 s, 4 s 6 s i dla drugiej serii 6 s, 8 s, 10 s. Autor analizuje fotoluminescencję dla pomiarów w 10 K dla nominalnych parametrów technologicznych i wyciąga wniosek nt. uzyskania lepszej jakości interfejsów w drugiej serii. Moim zdaniem jest to zbyt daleko idący wniosek, gdyż nie przedstawiono innych badań charakteryzacyjnych struktur, a twierdzenie opiera się najprawdopodobniej na intensywności fotoluminescencji oraz szerokości połówkowej linii. Poprawa jakości optycznej interfejsów w ogólności może wynikać z wielu innych parametrów technicznych np. konkretnej kalibracji, warunków epitaksji i temperatury podłoża, poziomu domieszkowania resztkowego oraz historii reaktora dla danej serii. Kolejnymi danymi są widma odbicia w funkcji temperatury od 10 K do 300 K, które przedstawiają szereg rezonansów odpowiadających przejściom między pasmami w strukturze W-QW. Pomiary odbicia uzupełniają następnie pomiary absorpcji przejściowej, z których autor wysuwa wniosek, iż szybka składowa zaniku (odpowiadająca za procesy niepromieniste) jest praktycznie taka sama dla wszystkich próbek, a wolno-zmienna składowa zmienia się od 0,84 ns do 5,1 ns i silnie zależy od czasu nasiąkania. Proszę o wyjaśnienie rysunku 5.30 – wartości czasu na rysunku nie odpowiadają tym w tekście. Autor identyfikuje przejścia optyczne poprzez porównanie ich eksperymentalnych wartości z obliczeniami $8k \cdot p$ (nie zostało wyjaśnione w tekście czym się różni od $k \cdot p$) dla struktury z ostrymi interfejsami oraz częściowo rozmytymi interfejsami wewnętrznymi. Niestety autor nie wyjaśnia, dlaczego zaniedbuje rozmycie kolejnego interfejsu (barierowego) patrz rys. 5.31.

Ostatni szósty rozdział to Podsumowanie krótko opisuje najważniejsze uzyskane wyniki, a następnie przedstawiony jest dorobek naukowy składający się z: *Publikacje w tematyce rozprawy doktorskiej* (3), *Pozostałe publikacje* (11) i *referaty konferencyjne* (15) oraz na koniec *Udział w projektach badawczych* (5).

Podsumowując przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską mgr inż. Tristana Smółki należy przyznać, iż przedstawione badania stanowią ważny wkład w rozwój nowych materiałów półprzewodnikowych dla optoelektroniki średniej podczerwieni. Uzyskane rezultaty dają możliwość nieniszczących badań przejść istotnych w przyszłych zastosowaniach optycznych przyrządów półprzewodnikowych, w tym laserów na ww. zakres spektralny. Autor niewątpliwie opanował metody badawcze w zakresie optyki półprzewodników w średniej podczerwieni takie jak FTIR, odbicie, fotoluminescencja i fotoluminescencja czasowo-rozdzielcza, a także metodę absorpcji przejściowej w układzie pompa-sonda. Istotne jest to, że wszystkie te pomiary wymagają dużej biegłości w celu wyeliminowania wpływu tła i właściwego wyodrębnienia sygnału poprzez metody modulacyjne lub zależne od czasu.

Rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim, w sposób zrozumiały dla osób zaznajomionych z tematyką eksperymentalną oraz zagadnieniami fizyki i technologii półprzewodnikowych. Pierwsze rozdziały wprowadzające do tematyki pracy z dziedziny fizyki półprzewodników, materiałów półprzewodnikowych oraz technik pomiarowych bardzo krótko opisują zakres najczęściej przedstawiany w szerokich opracowaniach i tutaj odniosłem wrażenie, iż mógłby to być materiał lepiej przedstawiony w rozprawie lub ewentualnie w bardziej ograniczonym zakresie, ale z odpowiednimi odnośnikami. Oprócz tego uważam, iż autor powinien zwrócić większą dbałość językową i eliminować nazewnictwo angielskie w tekście polskim. Rozprawy doktorskie oprócz waloru raportu z badań doktoranta mają też walor prezentacji nowej nauki opisanej w języku polskim i tym samym powinny być bardziej przystępne dla kolejnych doktorantów oraz szerszego grona czytelników, również tych bez specjalistycznej wiedzy. Dlatego uzasadnione byłoby, aby korzystać z istniejących polskich tłumaczeń i używać adekwatne słowa polskie. Takie podwójne polsko-angielskie nazewnictwa, chociaż są powszechne w potocznym języku naukowym, mocno rozpraszają w trakcie czytania i obniżają właściwy odbiór pracy. Oprócz bardzo wielu pojedynczych miejsc w całym tekście rozprawy z drobnymi uchybieniami językowymi, moim zdaniem na podkreślenie zasługują wielokrotne i ewidentne błędy językowe w cz. *Dorobek naukowy*, w szczególności dot. konferencji cyt. „*Typ wystąpienia: poster*” oraz „*Typ wystąpienia: speech*”, które powinny być odpowiednio nazwane *plakat* i *wystąpienie ustne*. Kolejnym chochlikiem edytorskim jest kilkakrotnie występujący zamiast ang. słowa „type” w tytułach prac w j. angielskim cyt. „...Typ wystąpienia...”. Podobne zastrzeżenia mam do właściwej edycji i przedstawienia bibliografii, gdzie bardzo często cytowane tytuły prac, zawierające oznaczenia związków półprzewodnikowych, są pod względem edytorskim zapisane wadliwie i w ten sposób jest utrudniony odczyt (przykład poniżej):

[52] J. Kopaczek, R. Kudrawiec, W. M. Linhart, M. K. Rajpalke, K. M. Yu, T. S. Jones, M. J. Ashwin, J. Misiewicz, and T. D. Veal. **Temperature dependence of the band gap of gasb1–xbix alloys with 0 < x < 0.042 determined by photoreflectance**. Appl. Phys. Lett., 103:261907, 2013. 49

Chociaż to zastrzeżenie dotyczy to głównie pisowni chemicznej związków półprzewodnikowych i ma niewielki wpływ na odnalezienie konkretnej referencji, to w tym względzie zbytne poleganie autora na edytorach tekstu i bazach danych, psuje właściwy odbiór pracy. Takie niezbędne korekty powinny zostać wykonane przed złożeniem pracy do recenzji.

Jednym z poważnych błędów językowych jest też cyt. „bezpośrednia przerwa energetyczna” użyta w rozprawie na str. 6 i 13, która jest kalką językową z j. angielskiego. Podobnie na str. 8 cyt. „w której dozwolone stany energetyczne tworzą ciągłe pasma, oddzielone **zakazanymi** dla nośników przerwami energetycznymi” słowo *zakazanymi* zamieniłbym na *zabronionymi*.

Kolejnym uchybieniem, moim zdaniem, które obniża wartość dla szerszego odbiorcy, to fakt, iż większość rysunków jest w języku angielskim, który jest co prawda językiem nauki, ale autor rozprawy

wybierając język polski powinien podjąć również wysiłek, aby przetłumaczyć najważniejsze rysunki ze swoimi wynikami badań.

Z zastrzeżeń dot. staranności edycji pracy wybrałem kilka:

- W papierowej wersji numerowanie stron powinno być od zewnętrznej strony.
- Numerowanie stron (dwukrotna str. 12: raz jest *Spis treści*, raz *Związki półprzewodnikowe – teoria*).
- Rozwinięcie skrótów cyt. „MCT - ang. mercury cadmium telluride detector - detektor z tellurku kadmu-rtęci (HgCdTe)” – chociaż autor może dowolnie tworzyć skróty to MCT jest ogólnie przyjętym skrótem dla tellurku kadmowo-rtęciowego, również badanego i wytwarzanego w Polsce, dlatego skrót MCT dla detektora wydaje się być nieodpowiedni.
- Brakuje w pracy dobrej definicji heterostruktury, którą autor wydaje się traktować jako sekwencję półprzewodnikowych warstw epitaksjalnych, ale brak jest informacji czy to są dwuwymiarowe czy w ogólności też inne struktury. Z tego wynika brak jasnego przekazu, że dla dwuwymiarowych struktur w kierunku z (wzrostu epitaksjalnego) jest kwantowe ograniczenie przestrzenne, co ma swoje konsekwencje dla badanych przejść optycznych.

Rozwinięcia skrótów anglojęzycznych powinny być podczas ich pierwszego użycia – przykłady poniżej:

- CHHS (w wariantcie CHSH) użyte str. 33, 58 i 59, a właściwe rozwinięcie skrótu str. 70
- MBE użyte str. 47, a rozwinięcie na str. 48 i 59.
- Brak wyjaśnienia angielskiego skrótu MOVPE.

Są też oczywiście inne drobne uchybienia edytorskie np. jak brak spacji lub kropka zamiast przecinka w liczbach przedstawianych w tekście w języku polskim, które wynikają z kalki językowej z angielskiego i prawdopodobnie jest to jedynie związane z nieodłączną presją czasu podczas pisanie rozprawy.

Niemniej jednak, pomimo zastrzeżeń co do staranności, w moim odczuciu rozprawa świadczy o dobrym rozumieniu zagadnień, które zostały w niej zaprezentowane oraz bardzo dobrym warsztacie doktoranta.

Uważam, że przedstawiona mi praca doktorska mgr inż. Tristana Smółki stanowi oryginalne rozwiązanie problemów naukowych dotyczących optycznych właściwości półprzewodnikowych układów niskowymiarowych przeznaczonych do zastosowań w emiterach promieniowania z zakresu średniej podczerwieni. Doktorant wykazał się wiedzą oraz zrozumieniem odpowiednich procesów fizycznych, wykazuje kompetencje eksperymentalne oraz umiejętność prowadzenia pracy naukowej w zakresie fizyki. 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 mgr inż. Tristana Smółki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Grzegorz Cywiński