

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
magistra Marcina Stachowicza

Rozprawa doktorska magistra Marcina Stachowicza, zatytułowana „Spektroskopowe badania domieszkowanych erbem warstw epitaksjalnych GaN, InGaN i struktur GaN:Er/AlN”, została wykonana w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie pod kierunkiem promotora, prof. dra hab. Adriana Kozaneckiego.

Rozprawa liczy 143 strony. Składa się z napisanego po angielsku Abstraktu i napisanej po polsku zasadniczej rozprawy w tym ze Wstępu, dwóch rozdziałów, Podsumowania, Bibliografii, oraz ze spisu rysunków, tabel i publikacji Autora, związanych i niezwiązanych z tematyką rozprawy. Struktura rozprawy jest logiczna i przejrzysta, a proporcje pomiędzy różnymi jej częściami są właściwe.

Abstrakt to bardzo skrótkowe ale pełne przedstawienie tematyki rozprawy, w tym opis badanych próbek, celów, metod i wyników zawartych w rozprawie. Warto podkreślić, że tematyka rozprawy jest nowoczesna i interesująca zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia.

Podobny charakter ma Wstęp, w którym Autor dość szczegółowo omawia zawartość poszczególnych rozdziałów i podrozdziałów rozprawy. Obiektem badań Autora są cienkie warstwy GaN i InGaN domieszkowane Er, podwójnie domieszkowane warstwy GaN (Er i Yb) a także struktury kwantowe GaN/AlN domieszkowane Er. Wszystkie próbki zostały wytworzone w grupie prof. Hoang-Xinga Jianga (Kansas State University, USA) opatentowaną metodą MOCVD. Domieszkowanie było prowadzone w trakcie wzrostu. Wyjątek stanowiły próbki GaN podwójnie domieszkowane (Er i Yb) metodą implantacji.

Cele badań wraz z uzasadnieniem stanowią treść pierwszego podrozdziału rozdziału 1. Oczywiście najważniejszy powód zainteresowania erbem jako aktywatorem emisji to długość fali tej emisji, 1,54  $\mu\text{m}$ , wpasowującej się w okno transmisji światłowodów, ważnych dla telekomunikacji optycznej. Emisja ta powstaje w wyniku przejścia w jonie  $\text{Er}^{3+}$ , z pierwszego stanu wzbudzonego  $^4I_{13/2}$  do stanu podstawowego,  $^4I_{15/2}$ . Optymalizacja tej emisji, a także poszukiwanie możliwości jej wzmocnienia to oczywiste cele, które stawia przed sobą Autor rozprawy. Może to nastąpić poprzez wybranie odpowiedniego mechanizmu wzbudzenia (bezpośrednie wzbudzenie jonu lub wzbudzenie za pośrednictwem matrycy), ale także poprzez kodomieszkowanie i uczulanie (np. stosując Yb), lub umieszczenie jonu  $\text{Er}^{3+}$  w odpowiednich strukturach kwantowych.

Jednak pierwszym celem pracy powinno być i jest uzupełnienie i weryfikacja schematu poziomów energetycznych stanu podstawowego i trzech stanów wzbudzonych w próbkach GaN otrzymanych metodą MOCVD dla wyższych koncentracji Er (2%), gdyż w badanych wcześniej warstwach GaN domieszkowanie prowadzono metodą implantacji przy niższych koncentracjach Er. Osiągnięcie tego celu jest warunkiem koniecznym dla osiągnięcia drugiego celu, którym jest zbadanie możliwości użycia jonów  $\text{Er}^{3+}$  jako sondy nieporządku w stopie InGaN. Możliwość przeprowadzenia takich badań pojawiła się dzięki dostępowi do unikatowych próbek InGaN domieszkowanych Er w procesie wzrostu.

Kolejny cel pracy to próba zwiększenia wydajności emisji Er o długości fali 1,54  $\mu\text{m}$ . W rozprawie Autor przedstawia dwa sposoby osiągnięcia tego celu. Pierwszy to wspomniane wyżej współdomieszkowanie Yb w celu uczulenia emisji Er. Drugi to trudny technologicznie sposób polegający na umieszczeniu jonów Er w strukturach kwantowych. Wymaga to selektywnego domieszkowania w trakcie epitaksjalnego procesu wzrostu struktury, gdyż

selektywna implantacja domieszki do właściwych warstw struktury wielowarstwowej jest raczej niemożliwa. Podejście takie było już z sukcesem stosowane dla epitaksjalnie otrzymywanych struktur GaN:Eu/AlGaIn dając trzykrotne wzmocnienie emisji. W rozprawie Autor opisuje pierwszą taką próbę dla struktur z Er, GaN:Er/AlN.

Kolejny podrozdział rozdziału 1 zawiera krótką charakterystykę materiałów półprzewodnikowych z grupy azotków Ga, Al oraz In (podrozdział 1.2). Autor zwraca uwagę na szeroką prostą przerwę energii wzbronionej istotną dla zastosowań optoelektronicznych w szerokim zakresie spektralnym, od podczerwieni do ultrafioletu. Względnie duża energia wiązania pozwala na stabilną pracę w wysokich temperaturach, a wysoki współczynnik przewodności cieplnej umożliwia efektywne odprowadzenie ciepła ważne dla pracy z wysokimi prądami. Te własności, a także możliwość wytworzenia materiałów typu n i p, zdecydowały o możliwości użycia azotków, przede wszystkim galu, indu i aluminium do komercyjnej produkcji diod LED emitujących światło zielone, niebieskie i ultrafioletowe.

Podobny, informacyjny i przeglądowy charakter ma kolejny podrozdział rozdziału 1, z numerem 1.3. Jest to skrót podstawowych informacji o pierwiastkach ziem rzadkich, przede wszystkim, ale nie wyłącznie o Er i Yb, związanych z ich strukturą elektronową, poziomami energetycznymi i przejściami odpowiedzialnymi za emisję i jej podstawowe cechy takie jak charakterystyki spektralne i czasy życia.

W podrozdziale 1.4 Autor wylicza najważniejsze zastosowania ziem rzadkich, wymieniając wzmacniacze optyczne, wyświetlacze diodowe, gdzie dla uzyskania pełni barw używa się jako aktywatora Tm, Er i Eu, lasery o małych rozmiarach (YAG:Er), detektory na ciele stałym, znaczniki fluorescencyjne z wykorzystaniem zjawiska up-konwersji, magnesy, fosfory, szkła o wysokim współczynniku załamania itd.

Podrozdział 1.5 jest poświęcony mechanizmom wzbudzenia jonów ziem rzadkich. Jak chodzi o fizykę stojącą za zjawiskami opisanymi w rozprawie to, moim zdaniem, najbardziej interesujący podrozdział w tej części pracy. Autor omawia tu rozważane teoretycznie przez Robbinsa i Deana procesy sekwencyjnej rekombinacji (wiązania) swobodnych nośników/ekscytonów przez jony ziem rzadkich, przekazu energii do jonu ziemi rzadkiej tzw proces DAR, który może być także odpowiedzialny za tłumienie emisji jonu ziemi rzadkiej. Proces tłumienia będzie efektywny wtedy, gdy wzbudzony jon ziemi rzadkiej będzie w rezonansie energetycznym z ekscytonem związanym na jonie ziemi rzadkiej. Możliwy jest wówczas powrotny transfer energii (back-transfer) połączony z termiczną jonizacją obu nośników tworzących ekscyton. Proces ten obniża wydajność luminescencji z jonu ziemi rzadkiej, gdyż swobodna para elektron-dziura może zrekombinować bezpromieniście.

Kolejny podrozdział, 1.6, to zawiera omówienie literatury na temat Er w GaN, w tym Er wprowadzanego do GaN metodą implantacji (1.6.1) i podczas wzrostu (1.6.2) a podrozdział 1.7 przedstawia stan badań nad Er w stopie półprzewodnikowym InGaIn. Znaczenie trójskładnikowego stopu półprzewodnikowego InGaIn wynika z faktu komercyjnego stosowania tego stopu jako warstwy optycznie aktywnej w diodach LED, gdzie poprzez manipulację składem uzyskano zakres emisji od ultrafioletu do czerwieni. Aktywacja InGaIn erbem daje możliwość rozszerzenia tej emisji do podczerwieni. Najbardziej obiecujące wyniki otrzymano dla domieszki podczas wzrostu; niską wydajność dla aktywacji erbem poprzez implantację tłumaczono obecnością w warstwie implantowanej defektów działających jako centra rekombinacji bezpromienistej. W podrozdziale 1.7.1 Autor wskazuje na przykład (Er:SiC) możliwości stosowania spektroskopii do identyfikacji różnych centrów emisyjnych związanych z Er; daje to szansę na zastosowanie spektroskopii Er jako sondy nieporządku stopowego w InGaIn.

Podrozdział 1.8 jest poświęcony problemowi wzmocnienia emisji Er w półprzewodnikach. Emisja ta ma niską wydajność w temperaturze pokojowej. Jej zwiększenie jest możliwe, jak wylicza Autor, na 4 sposoby, opisane w kolejnych podrozdziałach. Pierwszy to zastosowanie materiału z szeroką przerwą energii wzbronionej co jak wiadomo zmniejsza gaszenie termiczne emisji Er, drugi praktycznie sprowadza się do tego samego (odsunięcie poziomów związanych z Er od dna pasma przewodnictwa), trzeci to użycie uczulaczy emisji Er (np. Yb), a czwarty to umieszczenie jonów Er w strukturach kwantowych. Autor kompetentnie i wystarczająco dokładnie omawia opisane w literaturze wyniki uzyskane do tej pory. Omówione podrozdziały stanowią dobre wprowadzenie do tematyki rozprawy, świadczą także pozytywnie o wiedzy Autora w uprawianej przez niego dziedzinie.

Ostatnie podrozdziały rozdziału 1, poświęcone są opisowi próbek i układów eksperymentalnych. Opisana jest także procedura otrzymywania próbek i podane są schematy blokowe i parametry charakteryzujące wykorzystaną w badaniach aparaturę. Pewien niedosyt czuję po przeczytaniu podrozdziału 1.9.3 o układzie do pomiarów fotoluminescencji z wysoką rozdzielczością (spektrometr fourierowski). Za działaniem takiego układu stoi ciekawa fizyka i warto może było poświęcić temu dodatkowe pół strony. Dyskusja Autora ograniczeń tego przyrządu mogłaby być wtedy bardziej zrozumiała.

Drugi, najobszerniejszy rozdział rozprawy zawiera wyniki pomiarów wykonanych przez Autora, ich omówienie i interpretację. Podrozdział 2.1 poświęcony jest identyfikacji poziomów energetycznych Er w GaN oraz charakterystyce emisji Er (gaszenie termiczne i czasy zaniku), podrozdział 2.2 koncentruje się na erbie jako sondzie nieporządku stopowego w GaInN, 2.3 skupia się na problemie uczulania jonów Er przy pomocy jonów Yb w GaN:(Er, Yb) i w końcu w podrozdziale 2.4 Autor przedstawia wyniki pomiarów i dyskutuje problem wzmocnienia emisji jonów  $Er^{3+}$  umieszczonych w strukturach kwantowych GaN/AlN.

Pomiary widm luminescencji Er w GaN (domieszkowanie w trakcie wzrostu metodą MOCVD) pokazują liniową zależność intensywności od koncentracji domieszki co oznacza, że procesy kooperatywne nie mają w zakresie stosowanych koncentracji i mocy wzbudzenia, większego znaczenia. Dla potrzeb analizy liczby centrów i dokładnego określenia energii poziomów pomiary przeprowadzono w dostatecznie niskich temperaturach i z dostatecznie wysoką rozdzielczością, stosując spektrometr fourierowski. Pierwszą część pomiarów wykonano dla trzech temperatur, 6, 20 i 40 K dzięki czemu można było zaobserwować termicznie aktywowaną emisję z wyższych, rozszczepionych polem krystalicznym poziomów stanu  ${}^4I_{13/2}$ . Wyznaczone energie aktywacji bardzo dobrze pasują do energii wyznaczonych po zastosowaniu analizy położenia spektralnych linii widmowych. Analiza była dość skomplikowana, gdyż w krótkofalowej części widma obserwuje się trzy nachodzące na siebie zbiory linii, po trzy linie w każdym zbiorze. Odpowiadają one przejściom z trzech najniższych poziomów pierwszego wzbudzonego stanu  ${}^4I_{13/2}$  do trzech najniższych poziomów stanu podstawowego  ${}^4I_{15/2}$ . Po wyznaczeniu energii trzech najniższych poziomów stanu  ${}^4I_{13/2}$  Autor podjął próbę wyznaczenia, z długofalowej części widma, wyższych poziomów energetycznych stanu podstawowego. Zależności temperaturowe potwierdzają poprawność przyjętych na podstawie analizy odległości pomiędzy liniami przyporządkowań.

Dodatkowe pomiary dla temperatur powyżej 40 K pozwoliły znaleźć energie dla jeszcze wyższych poziomów. W sumie dzięki dobrze przemyślanej i wykonanej procedurze Autor zidentyfikował 35 linii i znalazł położenia wszystkich ośmiu poziomów stanu podstawowego  ${}^4I_{15/2}$  i siedmiu poziomów stanu wzbudzonego  ${}^4I_{13/2}$ . Wyznaczone energie tych poziomów zebrane są w tabeli 2.1 i przedstawione na diagramie poziomów na rys. 2.10.

W kolejnym kroku Autor dokonał analizy widm wzbudzenia do stanów  $^4I_{11/2}$  i  $^4I_{9/2}$ . Zestawienie zidentyfikowanych linii wraz z wyznaczonymi eksperymentalnie energiami przedstawił Autor w tabeli 2.2 dla stanu  $^4I_{11/2}$  i tabeli 2.3 dla stanu  $^4I_{9/2}$ , a odpowiednie diagramy znajdują się na rys. 2.14 i 2.15. Autor uzyskał pełną zgodność z wcześniejszymi badaniami na próbkach z tego samego źródła (Ho et al). Wyniki eksperymentalne zostały porównane z wynikami otrzymanymi z obliczeń teoretycznych. Szczegóły tych obliczeń zostały pominięte (znajdują się one w pracy opublikowanej w 2014 roku w Opt. Mat.). W rozprawie Autor podaje standardową formę hamiltonianu i omawia występujące w nim parametry. Zestawienie i porównanie wartości eksperymentalnych i teoretycznych przedstawił Autor na rys. 2.17. Energie uzyskane z obliczeń i eksperymentu są zbieżne.

Badania termicznego tłumienia emisji Er w próbkach GaN domieszkowanych Er w trakcie wzrostu Autor przedstawia w podrozdziale 2.1.2. Stosując dwa różne wzbudzenia (rezonansowe 496,5 nm do stanu  $^2H_{11/2}$  i powyżej przerwy energii wzbronionych, 333 nm, a także rezonansowe 809,2 nm do stanu  $^4I_{9/2}$  i nierezonansowe ale poniżej przerwy energii wzbronionych, 501,7 nm) Autor zaobserwował bardzo różne zależności scałkowanej intensywności emisji od temperatury. Przy wzbudzeniu rezonansowym do wyższych stanów wzbudzonych  $Er^{3+}$  obserwuje się znacznie silniejsze gaszenie termiczne o ponad 60% wartości w temperaturze 6 K dla temperatury pokojowej, co oznacza wyższą efektywność wzbudzenia pośredniego z udziałem matrycy. Dopasowania do równania Arrheniusa (z jedną lub dwoma eksponentami) dają energie aktywacji przy czym dla wzbudzenia bezpośredniego występuje jedna energia aktywacji (jeden proces) a dla wzbudzenia pośredniego przynajmniej dwie. Otrzymane wyniki zostały przedstawione w tabeli 2.5. Autor dyskutuje te wyniki w kontekście różnych modeli zaproponowanych w literaturze wskazując na różne możliwe przyczyny obserwowanego zachowania; zasadnicze znaczenie przywiązuje jednak do głębokiego poziomu defektowego związanego z Er odgrywającego rolę pułapki nośników ładunku zdolne do sekwencyjnego wychwytu tych nośników i, w wyniku ich niepromienistej rekombinacji, transferu energii do jonu Er. Odwrotny proces wstecznego transferu miałby być odpowiedzialny za silne temperaturowe gaszenie emisji dla wzbudzenia bezpośredniego.

W podrozdziale 2.1.3 Autor przedstawia wyniki pomiarów przebiegów czasowych przy wzbudzaniu impulsowym długościami fal z zakresu UV, powyżej przerwy energii wzbronionych. Badania prowadzono dla temperatur w zakresie od 20 K do 285 K. W wyniku dopasowania do jednej eksponenty Autor otrzymuje czasy zaniku, a stosując funkcję z dwoma eksponentami, także czas narastania. Wyniki dopasowań przedstawiono w tabeli 2.6. Zarówno czasy zaniku jak i narastania praktycznie nie zależą od temperatury i są zgodne z danymi literaturowymi.

Kolejny podrozdział, 2.2, jest poświęcony problemowi nieporządku stopowego w InGaN, gdzie Er jest wykorzystywany jako sonda tego nieporządku. Autor przebadał dwie próbki, o koncentracji In 5 i 9% przy tej samej koncentracji Er, ok. 2.3%at. Użycie Er jako sondy w stopach InGaN jest możliwe dzięki dobrze udokumentowanej dominującej pozycji jonów Er w GaN,  $Er_{Ga}$ , czego dowodzą także wyniki przedstawione we wcześniejszych rozdziałach tej rozprawy (pojedyncze centrum emisyjne).

Autor zaczyna od widm emisji dla wzbudzenia 333 nm i rezonansowego 809,4 nm do stanu  $^4I_{9/2}$  w temperaturze 6 K. Porównanie tych widm z widmem dla GaN:Er od razu wskazuje na nieporządek w stopie i wynikające stąd poszerzenie niejednorodne. Dalsze pomiary widm miały na celu wyjaśnienie przyczyn poszerzenia (selektywne wzbudzenie) i wyznaczenie energii poziomów. Rezultatem są schematy poziomów energetycznych dla InGaN:Er (dla dwóch koncentracji In) w zestawieniu z GaN:Er (rys. 2.38). Na schematach tych Autor zaznaczył także niejednorodne poszerzenie i, w niektórych przypadkach, przekrywanie się

poszerzonych poziomów. Warto zwrócić uwagę, abstrahując od poszerzenia niejednorodnego, na bliskie podobieństwo schematów poziomów Er dla InGaN i dla GaN.

Silny efekt gaszenia termicznego emisji Er w stopach InGaN Autor tłumaczy wielością różnych typów centrów erbowych, które nie wnoszą wkładu do emisji 1,54  $\mu\text{m}$  ale obniżają jej wydajność. Z kolei badania kinetyki luminescencji wskazują na obecność dwóch typów centrów Er; jedno, o dłuższym czasie życia bliskim temu obserwowanemu w GaN i drugie o krótszym. Czasy narastania są podobne. Autor interpretuje te obserwacje jako skutek obecności indu w dalszych strefach koordynacyjnych (dłuższy czas życia) i w strefie NNN. Podobne czasy narastania odpowiadają procesowi transferu energii z matrycy do jonu Er, podobnego dla wszystkich centrów Er.

W podrozdziale 2.3 Autor przedstawia badania uczulania jonów Er jonami Yb w GaN. Metoda ta wykorzystuje względnie wysoki przekrój czynny Yb na absorpcję światła o długości fali 980 nm, wykorzystywanego w światłowodowych wzmacniaczach. Efekt wzmocnienia emisji Er wskutek dodania Yb był wcześniej obserwowany w GaN:Er,Yb. Transfer energii z Yb do Er potwierdzają widma wzbudzenia emisji Er, w szczególności widma z rys. 2.47 (na tym rys. opis krzywych jest chyba błędny). Okazało się jednak, że procesowi transferu od Yb do Er towarzyszy proces odwrotny, od Er do Yb, co obniża jego wydajność. O zachodzeniu procesu odwrotnego świadczy detekcja emisji Yb przy wzbudzeniu Er (rys. 2.50 i 2.51). Przyczyną tego stanu rzeczy jest względne położenie poziomów energetycznych Er i Yb (rys. 2.54). Do sporządzenia diagramu energetycznego Autor użył własnych wyników. Schemat poziomów Yb wraz z przyporządkowaniem przejść pomiędzy poziomami do obserwowanych linii widmowych pokazano na rys. 2.53. Schemat dwukierunkowego transferu energii pomiędzy jonami Er i Yb, pokazano na rys. 2.55.

Znacznie lepsze wyniki dało drugie podejście do problemu wzmocnienia emisji z centrów Er w GaN, którym było umieszczenie Er w strukturze kwantowej, tzn w studniach kwantowych tak by zwiększyć gęstość nośników ładunku w pobliżu centrów Er. Wynika to z ustalonego wcześniej mechanizmu wzbudzenia jonów Er, opartego na ekscytonach lokalizujących się w pobliżu tych jonów. Porównanie widm fotoluminescencji (rys. 2.58) dla wielostudni GaN:Er/AlN i cienkiej warstwy GaN pokazuje znaczny, dziewięciokrotny wzrost natężenia emisji Er w strukturze. Łączna szerokość warstwy czynnej w obu próbkach była taka sama i otrzymane były w podobny sposób. Dalsze pomiary wykonał Autor na wielostudniach o zmieniającej się szerokości studni kwantowych (rys. 2.59) i barier (rys. 2.62). Pewnym brakiem tej części pracy jest dla mnie pozostająca niejasność co do mechanizmu transferu energii z matrycy do jonu Er; czy jest to sekwencyjna rekombinacja nośników ładunku na jonie Er czy też pułapkowanie swobodnego ekscytonu na jonie Er.

Rozprawę kończy Podsumowanie, w którym Autor raz jeszcze wymienia cele i omawia stopień ich realizacji.

Obszerna Bibliografia licząca 144 pozycje stanowi dobry wybór prac reprezentatywnych dla dziedziny uprawianej przez Autora i świadczy dobrze o jego orientacji i wiedzy w tym zakresie.

Załączony spis publikacji związanych z tematem rozprawy zawiera 5 pozycji. Autor rozprawy jest pierwszym autorem trzech z nich i drugim w pozostałych dwóch. Jedna z nich to Appl. Phys. Lett. o stosunkowo wysokim impact factorze, 3,57 (40 w punktacji MNiSW). Pozostałe publikacje to 17 pozycji opublikowanych w na ogół dobrych, wysoko punktowanych czasopiśmie. Autor rozprawy jest pierwszym autorem w jednej, w czterech drugim, a w pozostałych jest wymieniony na dalszych pozycjach. Jest to dorobek bardzo przyzwoity, dobry jakościowo i dobrze świadczy o Autorze, jego umiejętności współpracy z innymi osobami. Przeszukanie bazy Web of Science a także analiza obu list publikacji wskazują na

znaczący wzrost aktywności publikacyjnej na przestrzeni ostatnich 4 lat. Pierwsza z prac z bazy została opublikowana już w roku 2008 a druga w 2011 i kolejna w 2013, potem, w przeciągu 4 lat mamy 23 prace. Z kolei cytowania z kilku rocznie rosną do ok. 17 w roku 2014 do ponad 35 w roku 2016. W roku 2017 jest już ponad 25 co wyraźnie wskazuje na tendencję zwykłą. Dane te wskazują wyraźnie na dwa okresy, niskiej i wysokiej aktywności w działalności publikacyjnej magistra Marcina Stachowicza. Dorobek z ostatnich lat należy ocenić bardzo wysoko.

W rozprawie mgra Stachowicza nie zauważyłem poważniejszych błędów merytorycznych. Jej tematyka jest aktualna, nowoczesna, metody eksperymentalne są na wysokim poziomie i odpowiadają postawionym celom i problemom. Autor jest dobrym eksperymentatorem, także sprawnie posługuje się modelami fizycznymi i ma wycucie fizyki badanych zjawisk. Rozprawa jest napisana starannie, rysunki, wykresy, prezentacja jest jasna i przejrzysta. Rozprawa nie jest łatwa w czytaniu; pewnego wysiłku wymaga opanowanie i zapoznanie się z prezentowanym, bardzo obszernym i zróżnicowanym materiałem doświadczalnym, a także z interpretacjami i spekulacjami Autora. Są one interesujące ale z konieczności wchodzą dość głęboko w różne szczegóły i subtelności. Jak już wspomniałem pewnym mankamentem pracy jest dla mnie brak definitywnej konkluzji co do mechanizmu transferu energii od matrycy do jonu Er w badanych strukturach, co mogłoby stanowić centralny problem badań i samej rozprawy. Przywołanie mechanizmu ekscytonu związanego na jonie Er bez ostatecznego sprecyzowania szczegółów (sekwencyjne pułapkowanie nośników ładunku czy pułapkowanie ekscytonów) budzi pewien niedosyt. W początkowych rozdziałach Autor sugeruje sekwencyjny wychwyty nośników (np. rys. 1.6) i to zapoczątkowany wychwytem dziury ( $Er^{4+}$ ?). Pisząc o defektowym poziomie związanym z Er sugeruje, że jest to raczej pułapka elektronowa ( $Er^{2+}$ ?), a w części dotyczącej struktur kwantowych porównuje promień Bohra ekscytonu z wymiarami studni kwantowej. Jest w tym pewien brak konsekwencji a także brak definitywnej konkluzji co do natury samego procesu.

Pomimo tych zastrzeżeń, które wynikają po prostu, moim zdaniem, ze stopnia komplikacji badanych układów fizycznych i procesów w nich zachodzących, rozprawę doktorską mgra Stachowicza oceniam bardzo wysoko. Moim zdaniem spełnia ona wymagania obowiązującej ustawy o stopniach naukowych. Z pełnym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie jej Autora, magistra Marcina Stachowicza, do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Toruń, dnia 20 czerwca 2017 r.

*A. Wojtowicz*

prof. dr hab. Andrzej J. Wojtowicz  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet M. Kopernika w Toruniu