

Stanisław Krukowski
Instytut Wysokich Ciśnień PAN
01-142 Warszawa
ul Sokołowska 29/37

Handwritten signature

Dziekanat Wydziału Fizyki UW
Seksja ds. pracowniczych
Wpłynęło dn. 8.12.2014
podpis *Handwritten signature*

Rada
Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
ul Pasteura 5
02-093 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Joanny Płaziak
pt „Modelowanie diod świecących i laserowych na bazie heterostruktur azotkowych”**

Rozprawa doktorska mgr Joanny Płaziak pt „**Modelowanie diod świecących i laserowych na bazie heterostruktur azotkowych**” zawiera pięć rozdziałów poświęconych omówieniu fizycznych podstaw działania przyrządów półprzewodnikowych, półprzewodnikom azotkowym, metodom modelowania oraz przedstawieniu i dyskusji wyników modelowania, omówieniu zjawiska tunelowania oraz podsumowaniu wyników otrzymanych w rozprawie i perspektyw rozwoju w dziedzinach związanych z tematem rozprawy. Rozprawę uzupełnia spis treści, spis rysunków, tablic, publikacji i wystąpień. Na wstępie jest przedstawiony abstrakt w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym przedstawiono podstawy fizyczne teorii półprzewodników w zastosowaniu dla zrozumienia działania diod półprzewodnikowych w tym diod elektroluminescencyjnych (LED) i laserowych (LD). Jest to, więc przedstawienie zagadnień fizyki półprzewodników ograniczone do zjawisk transportu oraz emisji optycznej i rekombinacji niepromienistej. W tradycyjny sposób zjawiska transportu są omówione w przybliżeniu klasycznym od równania Boltzmanna przy czym jest wprowadzone przybliżenie czasu relaksacji używane w ogromnej większości prac badawczych w dziedzinie transportu w półprzewodnikach i metalach. Następnie autorka omawia w prosty sposób strukturę pasmową półprzewodników porównując półprzewodniki o przerwie prostej i skośnej, kluczowe dla działania diod półprzewodnikowych emitujących promieniowanie elektromagnetyczne. Autorka omawia funkcje rozkładu dla nośników w półprzewodnikach, samoistnych i domieszkowanych, i wprowadza podstawowe równania używane do opisu półprzewodników, a więc równania dryftu-dyfuzji oraz równanie Poissona. Kolejno omówione są procesy generacji i rekombinacji nośników, ze szczególnym uwzględnieniem rekombinacji promienistej, Shockley-Read-Hall, Augera. Wykład podstaw transportu w postaci klasycznej kończy wprowadzenie równania ciągłości będące zastosowaniem zasady zachowania ładunku dla klasycznej gęstości ładunków nośników elektronów i dziur, które stosujemy oddzielnie co w przypadku szerokiej przerwy półprzewodników azotkowych jest szczególnie dobrze uzasadnione. Wyrazy opisujące rekombinacje sprzęgają te obydwa równania. Rozdział 1 uzupełnia opis zjawisk tunelowania, oparty o zastosowanie równania Schrödingera do jednowymiarowej prostokątnej bariery potencjału, przedstawiając wkład kwantowy do klasycznego opisu transportu. Należy podkreślić, że zastosowany opis klasyczny z elementami kwantowymi jest używany szeroko na świecie i odzwierciedla stan wiedzy w tej dziedzinie.

Kolejny rozdział poświęcony jest półprzewodnikom azotkowym, jako szczególnej rodzinie półprzewodników III-V. Omawiane są podstawowe własności tych półprzewodników, w tym ich struktura krystalograficzna, o heksagonalnej strukturze wurcytu odróżniająca je od innych półprzewodników III-V charakteryzujących się regularną strukturą blendy cynkowej. Wprowadzone są własności energetyczne czystych i mieszanych półprzewodników AlN-GaN-InN, w tym przybliżenia Wegerda oraz omówiony jest parametr bowingu. Rozdział kończy wprowadzenie polaryzacji spontanicznej i piezoelektrycznej, zjawiska niesłuchanie istotnego dla działania przyrządów półprzewodnikowych opartych o układy studni kwantowych. Zjawisko to jest aktualnie szeroko dyskutowane w literaturze poświęconej działaniu przyrządów azotkowych.

Kolejny rozdział poświęcony jest krótkiemu omówieniu metod rozwiązywania równań różniczkowych opisujących diody azotkowe. Autorka wprowadza lakonicznie podstawy całkowania równań po czym skupia się bardziej szczegółowo na metodach używanych w pakiecie nextnano, który używała dla rozwiązania problemu. Autorka wspomina o jej wkładzie do oprogramowania, jednak bez dokładnego opisu tego wkładu.

Kolejny rozdział jest zasadniczy dla wartości rozprawy. Autorka opisuje w nim w sposób systematyczny wyniki modelowania dla diod azotkowych, poczynając od prostych przyrządów, w tym diody homozłączowej p-n, wprowadzając stopniowo rekombinacje do opisu układu, i wzbogacając katalog konstrukcji przyrządów od pojedynczej studni aż do pełnej struktury azotkowej diody laserowej. Autorka w sposób systematyczny omawia charakterystyki każdego z przyrządów wskazując na wpływ wprowadzanych elementów konstrukcji i dołączenia kolejnych zjawisk fizycznych. Rozdział ten jest jasno napisany obrazując działanie przyrządów i może służyć, jako pomoc zarówno dla innych badaczy planujących modelowanie podobnych przyrządów jak i badania doświadczalne, w szczególności systematyczne badania różnych konstrukcji przyrządów optoelektronicznych. Szczególnie wartościowe jest przedstawienie obrazu studni kwantowych oraz wpływu pól elektrycznych na działanie takich układów, co jest intensywnie badane w ostatnich latach. Związane jest to ze zjawiskiem obniżania efektywności działania diod LED dla wysokich napięć znanym, jako efficiency droop. Kolejny wartościowy fragment dotyczy przedstawienia wpływu warstwy blokującej elektrony (electron blocking layer - EBL), nowego elementu warunkującego efektywne działanie diod azotkowych, wprowadzonego przez S. Nakamurę. Obecność EBL warunkuje efektywne działanie azotkowych przyrządów. Autorka w sposób szczegółowy analizuje wpływ EBL na elektryczne i optyczne własności przyrządów co pozwala zrozumieć istotę wynalazku Nakamury. Ostatnim zasadniczym elementem diody LED są studnie kwantowe, w których autorka w sposób szczegółowy bada wpływ polaryzacji na działanie studni, a w szczególności na zjawiska rekombinacji promienistej i niepromienistej. Wykazuje że obecność pól elektrycznych w studniach, tzn. zjawiska kwantowo ograniczonego efektu Starka (quantum confined Stark effect - QCSE) w zasadniczy sposób wpływa na szybkość emisji promienistej. Ma to ogromny wpływ na efektywność działania przyrządów, co jest intensywnie badane od wielu lat na świecie. Rozdział kończy modelowanie pełnej struktury laserowej tzn. uzupełnionej o okładki AlGaN prowadzące do lokalizacji optycznej, które w istotny sposób zmieniają również inne własności struktur, w tym mechaniczne i optyczne. Autorka znajduje temperaturowe charakterystyki tych przyrządów i uzupełnia to o przedstawienie wpływu różnych typów rekombinacji na ich własności.

Ostatni zasadniczy rozdział jest wprowadzeniem zjawisk istotnie kwantowych do analizy własności diod półprzewodnikowych. Autorka wprowadza formalizm macierzy przejścia do analizy prądu tunelowania. Formalizm ten jest dobrze znany i używany do analizy zjawisk tunelowania, hoppingu jak również do opisu własności przewodników molekularnych. Następnie autorka wprowadza formalizm funkcji Greena, stosowany przy opisie transportu kwantowego, w tym transportu balistycznego. Autorka użyła tego formalizmu dla rozwiązania problemu tunelowania w tym formalizmie, przy czym współczynniki transmisji wyznaczyła używając pakietu nextnano. W sumie, więc autorka wniosła własny oryginalny wkład w rozwiązanie tego problemu. Autorka otrzymała szereg ciekawych własności związanych ze zjawiskiem tunelowania przez bariery, w tym zmiany charakterystyk prądowo-napięciowych. Nie rozumiem jednak, dlaczego zjawiska te zostały modelowane dla układów arsenkowych, podczas gdy reszta pracy poświęcona jest strukturom azotkowym.

Obok szeregu pozytywnych aspektów rozprawy, występuje szereg problemów, które należy omówić. Większość tych negatywnych spraw jest natury technicznej i nie wpływa na wartość rozprawy. Jednak dla porządku wymienię te najbardziej rzucające się w oczy, które moim zdaniem wynikają, jak przypuszczam, z pośpiechu w przygotowaniu tekstu. Chodzi więc o korektę pewnego podejścia polegającego na skrótowym przedstawieniu idei, co nie zawsze jest najlepszym pomysłem. Zacznę jak przystało od tytułu gdyż on wzbudza moje wątpliwości. W tytule są diody świecące i laserowe. I jest tutaj problem gdyż w literaturze światowej używa się diod LED (light emitting diodes) i LD (laser diodes), a w polskiej elektroluminescencyjnych i laserowych. Nie jest to dokładne gdyż dokładne tłumaczenie byłoby diody emitujące światło i laserowe. Chyba lepiej byłoby użyć dokładnego tłumaczenia, lub standardu. Z jakiego powodu Rada zaakceptowała to trzecie sformułowanie nie wiem, ale mi się nie podoba. Oczywiście w tym odpowiedzialność autorki jest

ograniczona. Inne znaczące niedoróbki to brak jasnego związku pomiędzy poszczególnymi elementami wywodu, np. autorka wprowadza równanie Boltzmanna do opisu transportu, a później wprowadza wyraz dyfuzyjny do równań transportu dziur i elektronów. Nie ma żadnego związku pomiędzy tymi elementami. Kolejny taki przykład to wprowadzenie struktury pasmowej i mas efektywnych. Nie ma przedstawionego związku pomiędzy tymi pojęciami. Inny podobny przykład to pojęcie dziury. Nie widzimy wprowadzenia tego pojęcia. Analogicznie wygląda sprawa wprowadzenia przedstawienia odchylenia od stanów równowagi za pomocą pseudo-poziomów Fermiego. Istotnym elementem jest brak zapisu równań używanych do opisu przyrządu i warunków brzegowych w rozdziale dotyczącym metodom numerycznym. Wreszcie nie ma definicji pojęcia polaryzacji i dyskusji związanych z tym problemów. Innym istotnym szczegółem jest brak określenia układu jednostek używanych w obliczeniach przedstawionych w tej rozprawie.

Z problemów redakcyjnych należy wymienić kłopoty w referencjach. Autorka podaje kontrowersyjny pogląd, że Pierre Auger nie opublikował pierwszy, choć był współodkrywcą zjawiska Augera, przy czym równocześnie odkryła to zjawisko Lise Meitner. Twierdzi, że Meitner pierwsza je opublikowała, przy czym nie podaje referencji do prac Augera, choć podaje pracę Meitner. Niedaleko stąd do sugestii ze pewnie Meitner odkryła pierwsza, tak wynika przynajmniej ze sformułowania tekstu "Pomimo że ...". Otóż chciałbym jednak prosić o nie kopiowanie brzydkich zwyczajów panujących u obydwu naszych sąsiadów. W tamtych czasach odkrycia były często prezentowane na posiedzeniach Towarzystw Naukowych i fakt późniejszej publikacji nie był czynnikiem decydującym. Dlatego jest to zjawisko Augera. Innym zupełnie aspektem listy cytowań jest brak referencji w i po 2010 roku. W zasadzie tych kilka (4) referencji jest z IWC PAN. Jest to miłe dla mnie pracującego w tym Instytucie, ale pewnie w innych ośrodkach nie próżnowano.

Uważam, że błędy te mają charakter redakcyjny i nie obniżają wartości rozprawy. Istotną jej zaletą jest wprowadzenie do obiegu naukowego w Polsce metodyki modelowania przyrządów elektronicznych. Jest to dodatkowy bardzo ważny element nowatorski, niezależnie od samej wartości naukowej otrzymanych wyników. Wydaje się, że dodatkową sugestią na przyszłość będzie w wprowadzenie wyników modelowania z Polski do światowego obiegu naukowego a więc jednak bardziej efektywne publikowanie tych wyników. Jest to trudne, gdyż ze względu na stereotypy na początku występuje duży opór, ale bezwzględnie konieczne.

Podsumowując ocenę rozprawy doktorskiej mgr Płaziak stwierdzam, że rozprawa ta spełnia wymogi związane z uzyskaniem stopnia doktora zgodnie z Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dziennik Ustaw Nr 65 poz. 595 wraz ze zmianami w Dziennik Ustaw z 2005 roku Nr 164, poz. 1365). W związku z tym wnioskuję do Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie mgr Płaziak do dalszych kroków postępowania w przewodzie doktorskim w celu nadania stopnia doktora nauk fizycznych.

St. Krukowski

Prof. dr hab. Stanisław Krukowski

Warszawa 01.12.2014