

dr hab. inż. Karol Tarnowski
Katedra Optyki i Fotoniki
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
e-mail: karol.tarnowski@pwr.edu.pl
tel: +48 71 320 44 41

Wrocław, 02.02.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.:
„Analiza dynamiki pola elektrycznego w niejednorodnie oświetlonych strukturach fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych”
mgr. inż. Błażeja Jabłońskiego

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Błażej Jabłoński podsumowuje przeprowadzone badania teoretyczne dotyczące procesu formowania się pola ładunku przestrzennego w strukturach półizolacyjnych wielokrotnych studni kwantowych. W ramach pracy Autor opisał podstawy teoretyczne zagadnienia, modele teoretyczne (analityczny i numeryczny) wykorzystywane do badania tego procesu, a przede wszystkim przedstawił wyniki szczegółowej analizy przeprowadzonej z ich wykorzystaniem. Praca powstała na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie pod kierunkiem prof. dr. hab. Ewy Weinert-Rączki. Promotorem pomocniczym był dr hab. inż. Andrzej Ziółkowski.

Tematyka rozprawy obejmuje analizę złożonego procesu formowania się pola ładunku przestrzennego w półizolacyjnych wielokrotnych studniach kwantowych. Proces ten leży u podstaw zjawiska fotorefrakcyjnego prowadzącego do zmiany współczynnika załamania. W typowej konfiguracji heterostruktura półprzewodnikowa składająca się z wielu studni kwantowych oświetlana jest dwiema falami, które tworzą wzór interferencyjny. Niejednorodne oświetlenie ośrodka przedkłada się na niejednorodny rozkład wzbudzonych nośników. Następnie, rozkład ten generuje wewnętrzne pole elektryczne, które zmienia współczynnik załamania (przez efekt elektrooptyczny). Zjawisko fotorefrakcyjne może być wykorzystane w optycznym przetwarzaniu informacji, co nadaje kontekst badaniom opisanym w rozprawie.

Zasadnicza część rozprawy obejmuje wprowadzenie, 5 numerowanych rozdziałów oraz podsumowanie (od strony 9 do strony 93). Rozprawę uzupełniają dodatek prezentujący zmierzone charakterystyki prądowo-napięciowe fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych (strony 94-100) oraz spisy rysunków (strony 101-111) i tabel (strona 112).

Stosowne odniesienia literaturowe zebrane są na końcu każdego rozdziału. Układ dokumentu jest klarowny, a kolejne elementy rozprawy układają się w logiczną całość.

Wprowadzenie zwięźle przedstawia tematykę rozprawy oraz określa problem naukowy, z którym zmierzył się jej autor. Wskazuje obszary wiedzy, w tematyce zjawiska fotorefrakcyjnego w heterostrukturach półizolacyjnych wielokrotnych studni kwantowych, wymagające uzupełnienia – w szczególności niepełny opis procesu formowania pola ładunku przestrzennego. Przedstawione cele pracy określają zaplanowaną strategię, która prowadziła do udowodnienia tezy postawionej przez autora rozprawy: „*Rozbudowa modelu numerycznego stosowanego do opisu właściwości fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych umożliwi przeprowadzenie dokładniejszej analizy zachodzących w nich zjawisk oraz otrzymanie lepszej zgodności rezultatów obliczeń z wynikami eksperymentalnymi*”.

Rozdział 1 (*Zjawisko fotorefrakcyjne*) zapoznaje czytelnika bliżej ze zjawiskiem fotorefrakcyjnym (w tym ze zjawiskiem nieliniowego transportu ładunków). Rozdział 2 (*Półprzewodnikowe wielokrotne studnie kwantowe*) zawiera opis budowy i właściwości wielokrotnych studni kwantowych. Te dwa rozdziały prezentują ogólną wiedzę autora rozprawy w dyscyplinie. Natomiast kolejne rozdziały przedstawiają modele opisujące badane zjawisko oraz uzyskane przy ich użyciu wyniki dotyczące heterostruktur opartych na układzie GaAs/Al_xGa_{1-x}As.

Rozdział 3 (*Metody analizy pola ładunku przestrzennego w strukturach półprzewodnikowych*) przedstawia model transportu pasmowego PDDT (Photogeneration-Diffusion-Drift-Trapping) dostosowany do opisu dwóch rodzajów nośników ładunku i uwzględniający wpływ nieliniowości transportu elektronowego. W modelu tym zapisuje się układ sześciu sprzężonych równań różniczkowych, które opisują zmiany koncentracji elektronów i dziur zachodzące na skutek ich generacji, transportu oraz rekombinacji. Układ ten można rozwiązywać metodami numerycznymi i – wprowadzając pewne przybliżenia – metodami analitycznymi. W rozprawie porównano wyniki uzyskane numerycznie i analitycznie wskazując zakres stosowalności przybliżonych metod analitycznych. Autor rozprawy jest współautorem jednej z publikacji opublikowanych przez grupę badawczą w tej tematyce:

Wichtowski M., Ziółkowski A., Weinert-Rączka E., Jabłoński B., Karwecki W., Influence of nonlinear electron mobility on response time in photorefractive semiconductor quantum wells, *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials* 21(4): 1250050 (2012).

Wyniki dalszych analiz przeprowadzonych przy użyciu modeli opisanych w rozdziale 3 zaprezentowano w następnych dwóch rozdziałach. Rozdział 4 (*Analiza pola elektrycznego w strukturze PR-MQW w geometrii mieszania dwóch fal*) przedstawia wyniki obliczeń

pokazujących wpływ różnych parametrów na formowanie się pola ładunku przestrzennego: (i) natężenia zewnętrznego pola elektrycznego, (ii) współczynnika kompensacji donorów, (iii) zależności współczynnika pułapkowania nośników od pola elektrycznego. Do ważnych wyników należą: pokazanie ewolucji w czasie całkowitego pola elektrycznego dla różnych natężeń zewnętrznego pola elektrycznego wraz z ilustracją coraz dłuższego dochodzenia do stanu stacjonarnego, a także wykazanie, że uwzględnienie nieliniowości transportu elektronowego wprowadza przesunięcie fazowe bliskie $\pi/2$ między polem ładunku przestrzennego a wzorem interferencyjnym dla natężenia zewnętrznego pola elektrycznego powyżej wartości krytycznej. Ponadto autor pokazał w rozprawie, jak współczynnik kompensacji donorów wpływa na ewolucję całkowitego pola elektrycznego, oraz że uwzględnienie zależności współczynników pułapkowania nośników od pola elektrycznego wpływa na pole ładunku przestrzennego w ograniczonym zakresie. Wyniki zaprezentowane w tym rozdziale były częściowo opublikowane w artykułach:

Jabłoński B., Impact of donor compensation ratio on photorefractive two-wave mixing dynamics in multiple quantum wells structures, *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials* 23(3): 1450029 (2014),

Jabłoński B., Ziółkowski A., Branecka A., Weinert-Rączka E., The impact of an electron and hole trapping coefficient on nonlinear phenomena in photorefractive multiple quantum well structures, *Photonics Letters of Poland* 8(4): 125 (2016).

Złożenie dwóch fal o różnych częstotliwościach pozwala uzyskać ruchomy wzór interferencyjny. Wpływ różnych parametrów na formowanie się pola ładunku przestrzennego był przedmiotem obliczeń, których wyniki zawiera Rozdział 5 (*Analiza zjawiska fotorefrakcyjnego w obecności ruchomego rozkładu wzoru interferencyjnego w strukturach PR-MQW*). Najważniejszymi wynikami przedstawionymi w tej części rozprawy są: pokazanie wpływu parametrów na wartość różnicy częstotliwości interferujących fal maksymalizującej wzmocnienie fotorefrakcyjne oraz skuteczne modelowanie literaturowych wyników pomiarów. Wyniki zaprezentowane w tym rozdziale były częściowo opublikowane w pracy:

Jabłoński B., Wichtowski M., Ziółkowski A., Weinert-Rączka E., Standard model of a photorefractive effect and moving grating wave-mixing in semi-insulating GaAs quantum wells, *Optical and Quantum Electronics* 49: 182 (2017).

W mojej ocenie rozprawa prezentuje wiedzę autora w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem rozprawy jest oryginalne

rozwiązanie problemu naukowego. Autor wykazał postawioną tezę dotyczącą możliwości przeprowadzenia dokładniejszej analizy zjawisk fotorefrakcyjnych dzięki rozwinięciu modelu numerycznego. Pewien niedosyt pozostawia brak szczegółowego wskazania w rozprawie, jaki był wkład autora w publikacje wieloautorskie związane z rozprawą. Ponadto, wskazane byłoby umieszczenie w rozprawie zestawienia publikacji autora rozprawy.

Układ pracy został dobrze przemyślany, dzięki czemu rozprawa – mimo, że ma charakter teoretyczny – jest przystępna dla czytelnika. Jednocześnie sędzę, że wskazane byłoby dodanie szerszego tła aplikacyjnego dla prezentowanych wyników badań.

Rozprawa jest bardzo dobrze przygotowana od strony edycyjnej. Rysunki i tabele są czytelne i bardzo dobrze ilustrują zagadnienia omawiane w rozprawie. Autor nie uniknął jednak pewnych drobnych błędów:

- w wielu miejscach używa kropki jako separatora dziesiętnego (np. w Tabeli 1.1.), nie będąc w tym konsekwentnym (np. w Tabeli 2.1. używa przecinka; na Rys. 2.6. jako separatora dziesiętnego używa raz przecinka a raz kropki);
- pomija interpunkcje w pobliżu równań (np. brak kropki po równaniu (2.10));
- na stronie 30 używa omyłkowo oznaczenia m_h^* , zamiast m_i^* ;
- na stronie 94 podaje grubość warstwy $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ jako 6 μm , zamiast 6 nm.

Podsumowując, rozprawa spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i może być podstawą nadania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Wymienione niedoskonałości nie mają wpływu na istotę osiągnięć autora, w związku z czym oceniam rozprawę pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie autora do kolejnych etapów postępowania.



Karol Tarnowski