

dr hab. inż. Jerzy Pluciński, prof. PG  
Katedra Metrologii i Optoelektroniki  
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki  
Politechnika Gdańska  
ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Gdańsk, 30 stycznia 2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej **mgra inż. Błażeja Jabłońskiego** pt.:  
**„Analiza dynamiki pola elektrycznego w niejednorodnie oświetlonych strukturach foto-  
refrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych”**

### **Uwagi ogólne**

Formalną podstawą prawną wykonania recenzji jest uchwała nr 32 z dnia 23 listopada 2023 r. Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie powołująca mnie na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr. inż. Błażejowi Jabłońskiemu, w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Dokumentację związaną z recenzją otrzymałem 4 grudnia 2023 r. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Ewa Weinert-Rączka, a promotorem pomocniczym – dr hab. inż. Andrzej Ziółkowski.

Rozprawa składa się z pięciu ponumerowanych rozdziałów, które poprzedza wprowadzenie, a zamyka podsumowanie i dodatek. Na końcu każdego rozdziału znajduje się wykaz bibliografii. Wykazy bibliografii mają również podsumowanie oraz dodatek. Rozprawa zawiera także spis rysunków, spis tabel oraz spis treści. Łącznie rozprawa liczy 112 stron.

### **Tematyka rozprawy**

Przedstawiona przez mgra inż. Błażeja Jabłońskiego rozprawa doktorska dotyczy analizy teoretycznej dynamiki procesów oraz oceny wpływu zjawisk nieliniowych występujących podczas formowania się pola ładunku przestrzennego w niejednorodnie oświetlonych strukturach półizolacyjnych wielokrotnych studni kwantowych.

### **Charakter rozprawy**

Rozprawa ma głównie charakter teoretyczny – jedynie wyniki symulacji przesunięcia pola ładunku przestrzennego w funkcji różnicy częstotliwości interferujących ze sobą wiązek promieniowania optycznego, które tworzą ruchomy wzór interferencyjny, oraz wpływu implantacji protonami na fotoprzewodnictwo w strukturach półizolacyjnych fotorefrakcyjnych wielokrotnych studniach kwantowych (ang. photorefractive multiple quantum wells – PR-MQW) były porównane z wynikami pomiarów wykonanych przez innych autorów, dostępnych w literaturze.

### **Problem badawczy, cel i teza pracy**

Problem badawczy, cel i teza pracy zostały przedstawione w punkcie zatytułowanym „Wprowadzenie”. Problemem tym było przebadanie zjawisk nieliniowych w strukturach fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych z punktu widzenia możliwości zastosowania tych materiałów, na przykład w celu efektywnego przełączania i przetwarzania sygnałów optycznych. Doktorant zauważył, że mimo istnienia wielu prac opisujących właściwości

fotorefrakcyjnych struktur PR-MQW, opis teoretyczny niektórych występujących w nich zjawisk nie był w pełni satysfakcjonujący i zgodny z wynikami doświadczeń. W szczególności Doktorant postanowił teoretycznie przebadać, wykorzystując analizę numeryczną, niektóre właściwości i zjawiska występujące w tych strukturach, na przykład proces formowania się pola ładunku przestrzennego i jego przesunięcia względem wzoru interferencyjnego w wypadku ruchomej siatki. Aby rozwiązać te problemy, Doktorant sformułował następujący główny cel pracy, jakim było *„uzupełnienie wyników wcześniejszych prac dotyczących mieszania dwufalowego w strukturach PR-MQW oraz udoskonalenie metod ich analizy”*. W szczególności w ramach tego celu Doktorant postawił sobie za zadanie również:

- porównanie dwóch sposobów rozwiązywania równań opisujących badane zjawiska – metody analitycznej i numerycznej, oraz określenie zakresu ich stosowalności,
- analizę dynamiki zaindukowanych optycznie rozkładów: koncentracji nośników ładunku, koncentracji zjonizowanych pułapek oraz wewnętrznego pola elektrycznego dla różnych warunków eksperymentu,
- zbadanie, jaki wpływ na zjawiska fotorefrakcyjne mają parametry materiałowe struktury, takie jak rodzaj i koncentracja domieszek, oraz współczynnik pułapkowania nośników,
- rozbudowanie wcześniej stosowanego modelu numerycznego, tak aby uwzględnił ruchomy wzór interferencyjny,
- porównanie otrzymanych wyników obliczeń numerycznych z wynikami doświadczalnymi i przybliżonymi obliczeniami opartymi na linearyzacji równań.

W rozprawie sformułowano również następującą tezę:

*„Rozbudowa modelu numerycznego stosowanego do opisu właściwości fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych umożliwia przeprowadzenie dokładniejszej analizy zachodzących w nich zjawisk oraz otrzymanie lepszej zgodności rezultatów obliczeń z wynikami eksperymentalnymi.”*

Przedstawione przez Doktoranta cel, zadania i teza pracy są precyzyjnie i jasno sformułowane.

### **Rozwiązanie problemu**

Doktorant rozpoczyna opis rozwiązania postawionego problemu badawczego w Rozdziale 1, przedstawiając, czym jest zjawisko fotorefrakcyjne, oraz jego podstawowe cechy. W zjawisku fotorefrakcyjnym wyróżnił cztery procesy: generacja nośników, transport nośników, pułapkowanie nośników i efekt elektrooptyczny. Następnie przedstawił efekt fotorefrakcyjny za pomocą modelu transportu pasmowego, w którym nośniki ładunku są wzbudzone do pasm energetycznych, umożliwiając im swobodne przemieszczanie się. Szczególną uwagę Doktorant zwrócił na zjawisko nieliniowego transportu elektronów, który występuje po przekroczeniu wartości krytycznej pola elektrycznego, dla której zależność pomiędzy prędkością elektronów a natężeniem pola elektrycznego staje się silnie nieliniowa. Doktorant wprowadził pojęcie temperatury elektronowej, której wzrost związany jest ze wzrostem średniej energii kinetycznej elektronów, traktując swobodne elektrony jako „nagrzewający się” gaz elektronowy. Na podstawie własnych obliczeń Doktorant przedstawił zależności temperatury elektronowej, średniej ruchliwości i prędkości elektronów od pola elektrycznego dla arsenku galu. Zależności te są nieliniowe – zwłaszcza średnia ruchliwość elektronów i średnia prędkość unoszenia elektronów wykazują silną nieliniowość od zewnętrznego pola elektrycznego przyłożonego do badanej struktury.

Opisowi półprzewodnikowych wielokrotnych studni kwantowych na potrzeby rozprawy poświęcono Rozdział 2. Doktorant skupił się tu na studniach kwantowych formowanych za pomocą heterostruktur  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ze względu na małe niedopasowanie ( $\sim 0,16\%$ ) stałych sieci  $\text{GaAs}$  oraz  $\text{AlGaAs}$ , które w wypadku nawet niewielkiego niedopasowania powoduje szkodliwe dyslokacje sieci. W oparciu o jednowymiarowe stacjonarne równanie Schrödingera Doktorant przedstawił rozwiązania dla parzystych i nieparzystych funkcji falowych elektronów, ciężkich dziur i lekkich dziur znajdujących się wewnątrz pojedynczej studni kwantowej o szerokości 7,5 nm. W oparciu o te funkcje falowe wylicza następnie dla pierwszych trzech poziomów energetycznych występujących wewnątrz studni liczby falowe elektronów, ciężkich dziur i lekkich dziur oraz energie związane z tymi poziomami. Następnie Doktorant przedstawił funkcje falowe elektronów, ciężkich dziur i lekkich dziur dla struktur wielokrotnych studni kwantowych dla szerokości barier między studniami wynoszących 10 nm (tj. dla szerokości barier, dla których skutki zjawiska związane z tunelowaniem są bardzo małe – zjawisko to zaczyna odgrywać dużą rolę przy szerokości mniejszej od 6 nm). Przedstawione rozwiązania dotyczą struktur, w których studnie tworzyły warstwy  $\text{GaAs}$ , a bariery  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ . Oprócz analizy poziomów energetycznych związanych ze studniami kwantowymi przeanalizowano również poziomy energetyczne związane z ekscytonami, które mogą się pojawić w tych studniach. Piki ekscytonowe zostały uwzględnione przy wyznaczeniu widma absorpcji struktury studni kwantowej w układzie  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  w temperaturze pokojowej ( $T = 300 \text{ K}$ ), powołując się na bibliografię. Uwzględniono również wpływ zewnętrznego pola elektrycznego na położenie tych pików.

Rozdział 3 poświęcony jest metodzie analizy pola ładunku przestrzennego w fotorefrakcyjnych strukturach półprzewodnikowych. Doktorant użył znanego z literatury modelu transportu pasmowego PDDT (Photogeneration-Diffusion-Drift-Trapping), który obejmuje dwa rodzaje nośników ładunku i uwzględnia wpływ nieliniowości transportu elektronowego. Na podstawie bibliografii Doktorant przedstawił kluczowe równania transportu dla modelu jednowymiarowego (równania (3.1a) oraz (3.1b)), opisujące szybkość zmian koncentracji elektronów i dziur wywołanych generacją, transportem i rekombinacją nośników w strukturach wielokrotnych studni kwantowych w geometrii Franza-Keldysha. Równania te uzupełniają dodatkowe równania opisujące gęstości prądu elektronowego i dziurowego (równania (3.1c) oraz (3.1d)), równanie ciągłości wyrażające zasadę zachowania ładunku elektrycznego (równanie (3.1e)) oraz prawo Gaussa (równanie (3.1f)). Na podstawie tych równań Doktorant przedstawił schemat blokowy algorytmu numerycznego do modelowania zjawisk nieliniowych w strukturach półprzewodnikowych wielokrotnych studni kwantowych. Do rozwiązania powyższych równań wykorzystał metodę iteracyjną, powołując się na pracę Andrzeja Ziółkowskiego z 2014 roku opublikowaną w *Optics Express*. Doktorant stwierdził, że czas obliczeń numerycznych z wykorzystaniem tego algorytmu wynosił od kilku do kilkudziesięciu godzin – w zależności od natężenia pola elektrycznego i natężenia promieniowania optycznego. Niestety, Doktorant nie dostarczył informacji dotyczących wydajności komputera, na którym wykonywano obliczenia, nie określił języka programowania, w którym napisany był program komputerowy (ma to kluczowe znaczenie dla czasu obliczeń, np. dla dobrze zoptymalizowanego programu napisanego w języku Fortran lub C++ czas ten może być kilkukrotnie krótszy niż napisany w Mathematicie, około dziesięciokrotnie w Matlabie czy nawet od kilkudziesięciu do kilkuset razy krótszy niż w Pythonie), ani żadnej informacji, czy obliczenia były przeprowadzane jednowątkowo, czy wielowątkowo, a także informacji, jakich wartości natężenia pola elektrycznego i natężenia promieniowania optycznego czasy te dotyczą. Doktorant zaproponował linearyzację powyższych równań dla niektórych wypadków (tj. dla wiązek optycznych tworzących prążki interferencyjne, których okres jest dużo mniejszy niż długość analizowanej struktury, dla aproksymacji adiabaticznej, gdzie czas rekombinacji nośników jest dużo mniejszy od czasu formowania się pola ładunku przestrzennego). Linearyzacja ta pozwala na rozwiązanie równań transportu bez konieczności wykonywania obliczeń metodą iteracyjną, a przez to na ogromną redukcję czasu

obliczeń prowadzących do uzyskania tego rozwiązania (niestety, Doktorant nie podał, o ile wynosi ta redukcja). Przykładowe wyniki obliczeń ewolucji w czasie ładunku przestrzennego w strukturze wielokrotnych studni kwantowych otrzymanych po linearyzacji zostały porównane z wynikami otrzymanymi z wykorzystaniem algorytmu uwzględniającego nieliniowość transportu elektronowego. Dużą zgodność wyników obliczeń ewolucji obu metod uzyskano jedynie dla małej wartości (tj. mniejszej od 0,1) głębokości modulacji wzoru interferencyjnego. W rozprawie brakuje również weryfikacji doświadczalnej zgodności obliczeń z rzeczywistymi wartościami pola ładunku przestrzennego w strukturze wielokrotnych studni kwantowych o tych samych parametrach, jakie przyjęto w obliczeniach. Biorąc pod uwagę, że obie metody zostały wykorzystane w badaniach opisanych w dalszych rozdziałach pracy, weryfikacja doświadczalna byłaby bardzo wskazana – nawet jeśli nie obejmowałaby wyników pomiarów Doktoranta, mogłaby uwzględniać wyniki uzyskane przez inne osoby.

Metody analizy pola ładunku przestrzennego w fotorefrakcyjnych strukturach półprzewodnikowych z wielokrotnymi studniami kwantowymi, przedstawione w Rozdziale 3, zostały wykorzystane w badaniach teoretycznych nad wpływem różnych czynników na wewnętrzne pole elektryczne w geometrii mieszania dwóch fal. W szczególności zbadano wpływ parametrów materiałowych struktury, takich jak współczynnik kompensacji donorów, definiowany jako stosunek koncentracji płytkich domieszek (akceptorów) do koncentracji głębokich domieszek (donorów) i współczynnik pułpowania nośników (opisujący stosunek liczby uwięzionych nośników do liczby całkowitej nośników), a także natężenia promieniowania optycznego i okresu przestrzennego siatki interferencyjnej na dynamikę zjawisk nieliniowych w tych strukturach. Wyniki tych badań zostały przedstawione w Rozdziale 4. Ze względu na ograniczoną stosowalność metody wykorzystującej linearyzację równania transportu skupiono się na badaniach dla małych głębokości modulacji wzoru interferencyjnego (tj. dla współczynników kontrastu 0,05 lub 0,1). W pierwszej kolejności Doktorant przebadał wpływ zewnętrznego pola elektrycznego na ewolucję w czasie ładunku przestrzennego w strukturze wielokrotnych studni kwantowych – w tym na czasy odpowiedzi na skokowe pojawienie się zewnętrznego pola elektrycznego. Zbadano również, jak te stałe zależą od natężenia promieniowania optycznego padającego na strukturę oraz od okresu przestrzennego wzoru interferencyjnego utworzonego przez zewnętrzne promieniowanie optyczne. Różnice w uzyskanych wartościach pola elektrycznego między modelem uwzględniającym nieliniowy transport elektronów a modelem liniowym wyniósł w tych badaniach co najwyżej kilka procent. Wyznaczono również wartość amplitudy pola ładunku przestrzennego w funkcji natężenia pola przyłożonego do fotorefrakcyjnej struktury wielokrotnych studni kwantowych dla transportu nieliniowego oraz liniowego. W tym wypadku różnice wartości amplitudy tego pola dla natężenia pola zewnętrznego w przedziale od 5 kV/cm do 11 kV/cm przekraczały 100%, mimo głębokości modulacji wzoru interferencyjnego wynoszącej jedynie 0,1. Jeszcze większą rozbieżność uzyskano dla sinusa przesunięcia rozkładu fazowego pola elektrycznego względem wzoru interferencyjnego w funkcji natężenia pola elektrycznego przyłożonego do struktury. W tym wypadku różnice te dla silnego pola (większego od 5 kV/cm) wynosiły ponad 1000%.

Kolejnym aspektem przebadanym przez Doktoranta był wpływ współczynnika kompensacji donorów na koncentracje elektronów i dziur w badanej strukturze. Przebadano te koncentracje w funkcji czasu od momentu pojawienia się wzoru interferencyjnego dla różnych wartości tego współczynnika i dla różnych wartości natężenia zewnętrznego pola elektrycznego. Na podstawie tych badań wyznaczono wartości średnie oraz amplitudy pierwszych harmonicznych tych koncentracji. Dodatkowo, określono stosunek maksymalnej wartości koncentracji elektronów do maksymalnej wartości koncentracji dziur w funkcji współczynnika kompensacji donorów. Zbadano również, jak zmienia się czas formowania się pola ładunku przestrzennego oraz jak przebiega zależność natężenia całkowitego pola elektrycznego w stanie ustalonym, a także okres oscylacji występujących podczas formowania pola ładunku przestrzennego w funkcji zewnętrznego pola elektrycznego. Doktorant przeprowadził również badania nad wpływem

zależności współczynnika pułapkowania nośników od tego pola. W rezultacie uzyskano rozkład przestrzenny pola elektrycznego w strukturze wielokrotnych studni kwantowych w stanie stacjonarnym – zarówno dla małych, jak i dużych wartości głębokości modulacji wzoru interferencyjnego.

Doktorant przeprowadził również analizę zjawiska fotorefrakcyjnego w obecności ruchomego rozkładu wzoru interferencyjnego w strukturach fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych. Wyniki tej analizy zostały zawarte w Rozdziale 5. Badania obejmowały sytuację, w której głębokość modulacji wzoru interferencyjnego była mała (0,1) oraz duża (1,0). W analizie wykorzystano zarówno metodę iteracyjną, opartą na modelu transportu pasmowego PDDT z uwzględnieniem wpływu nieliniowości transportu elektronowego, jak również metodę opartą na równaniach transportu po ich wcześniejszej linearyzacji. Ruchomy wzór interferencyjny otrzymano poprzez interferencję dwóch wiązek spójnych różniących się nieznacznie częstotliwością. Symulacje wykazały, że wartość amplitudy pola ładunku przestrzennego zależy od tej różnicy i osiąga dla pewnej jej wartości (tzw. wartości optymalnej różnicy częstotliwości) maksimum. Obliczenia pokazały, że wartości optymalnej różnicy częstotliwości zależą liniowo od natężenia promieniowania optycznego tworzącego wzór interferencyjny. Jednak otrzymane wartości tej różnicy różnią się między sobą – nawet kilkunastokrotnie w zależności od zastosowanej metody. Świadczyć to może, że w tym wypadku zaproponowana przez Doktoranta metoda bazująca na równaniach transportu po ich linearyzacji nie sprawdza się, mimo że głębokość modulacji wzoru interferometrycznego była mała. Dokonano również porównania ewolucji amplitudy pola ładunku przestrzennego w czasie od momentu pojawienia wzoru interferencyjnego w wypadku stacjonarnego i poruszającego się tego wzoru w kierunku zgodnym albo przeciwnym w stosunku do zewnętrznego pola elektrycznego. Zbadano także przesunięcie fazy między zmodulowanym ładunkiem przestrzennym a fazą wzoru interferencyjnego. Również w tym wypadku uzyskane rezultaty różniły się znacznie, w zależności od zastosowanej metody analizy.

Analiza zjawiska fotorefrakcyjnego w obecności ruchomego rozkładu wzoru interferencyjnego o dużej głębokości modulacji (o wartości 1,0) w strukturach fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych obejmowała strukturę o parametrach, dla której wyniki pomiaru przesunięcia pola ładunku przestrzennego w funkcji różnicy częstotliwości interferujących ze sobą wiązek promieniowania optycznego tworzących ruchomy wzór interferencyjny były pomierzone i opublikowane przez innych autorów. Przedstawiono wyniki badań dla dwóch struktur różniących się współczynnikiem kompensacji donorów (0,5 lub 0,8). Niestety, w obu wypadkach wyniki te różniły się znacząco między sobą w zależności, czy były uzyskane na drodze modelowania, czy na drodze pomiarów. W wypadku sinusa kąta przesunięcia pola ładunku przestrzennego względem wzoru interferencyjnego różnice te sięgały nawet kilkudziesięciu i więcej procent dla dużej różnicy częstotliwości interferujących wiązek (większej od 30 kHz) tworzących ruchomy wzór interferencyjny – dla mniejszej różnicy częstotliwości różnice między sinusami kąta przesunięcia wynosiły co najwyżej kilkanaście procent, co można przyjąć za wartości satysfakcjonujące.

W Dodatku A Doktorant przedstawił wyniki badań struktur fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych w układzie GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As, które były poddane implantacji protonami o energii 80 keV albo 160 keV, o dawkach od  $1,0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  do  $2,0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Dla tych struktur obliczono oraz pomierzono natężenie prądu płynącego przez te struktury w funkcji zewnętrznego pola elektrycznego dla dwóch wartości natężenia promieniowania optycznego podającego na struktury i dla różnych wartości początkowej koncentracji akceptorów. Badania te są o tyle cenne, gdyż wyniki uzyskane na podstawie obliczeń i na podstawie pomiarów w tym wypadku okazały się wyjątkowo zgodne (szacowany błąd na podstawie przedstawionych wykresów można oszacować na mniejszy od 5%).

Podsumowując, postawiona teza rozprawy została udowodniona, a cel i zadania zrealizowane.

## Wiedza Doktoranta i znajomość literatury

Treści zawarte w rozprawie doktorskiej pozwalają stwierdzić, że Doktorant ma wystarczającą wiedzę na temat prowadzenia badań na pograniczu elektroniki, optoelektroniki, fotoniki i fizyki półprzewodników w zakresie pozwalającym na definiowanie i skutecznie rozwiązywanie problemów związanych z zaawansowanymi strukturami półprzewodnikowymi, zwłaszcza fotorefrakcyjnymi, metodami modelowania numerycznego. Jednak trudno jednoznacznie ocenić, czy znajomość literatury Doktoranta w tym obszarze jest wystarczająca, zwłaszcza literatury zawierającej najnowsze osiągnięcia związane z tematem rozprawy doktorskiej. Bibliografia rozprawy została przypisana do każdego z rozdziałów z osobna, a także do wprowadzenia i dodatku. Po zsumowaniu liczby pozycji zawartych w poszczególnych rozdziałach wraz z wprowadzeniem i dodatkiem obejmuje łącznie 89 pozycji. Liczba ta, jak na rozprawę doktorską, może wydawać się stosunkowo skromna, zwłaszcza że niektóre pozycje powtarzają się w kilku rozdziałach. Co więcej, **znaczna większość tych pozycji pochodzi z ubiegłego wieku** – liczba pozycji, które ukazały się później, stanowi mniej niż 25%.

## Wkład rozprawy w rozwój wiedzy związanej ze strukturami fotorefrakcyjnymi wielokrotnych studni kwantowych

Doktorant w oparciu analizę teoretyczną i modelowanie matematyczne z wykorzystaniem równań transportu zbadał przebieg procesu formowania się pola ładunku przestrzennego w strukturach półizolacyjnych wielokrotnych studni kwantowych z uwzględnieniem zewnętrznego pola elektrycznego, rozkładu natężenia światła i parametrów materiałowych. Zaproponował linearyzację równań transportu, czego skutkiem jest możliwość rozwiązania tych równań bez konieczności stosowania metod iteracyjnych, oraz wykonał wiele testów obliczeniowych dla różnych danych wejściowych zewnętrznego pola elektrycznego, rozkładu natężenia promieniowania optycznego i parametrów materiałowych, aby ocenić, w jakich warunkach zaproponowana metoda daje satysfakcjonujące wyniki.

## Oryginalny dorobek Doktoranta

Do oryginalnych osiągnięć Doktoranta zaliczyć można:

1. zaproponowanie metody rozwiązywania równań transportu opisujących generację, rekombinację i transport nośników ładunku dla struktury oświetlonej promieniowaniem optycznym w obecności zewnętrznego pola elektrycznego, opartej na linearyzacji tych równań, co umożliwiło znalezienie ich rozwiązań bez konieczności stosowania czasochłonnych metod iteracyjnych;
2. znalezienie rozwiązań układu równań transportu opisujących generację, rekombinację i transport nośników ładunku dla struktury oświetlonej dwiema interferującymi falami w półprzewodnikowych strukturach fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych dla różnych wartości współczynnika kompensacji donorów, współczynnika pułapkowania nośników i głębokości modulacji wzoru interferencyjnego, wykorzystując metodę opartą na nieliniowych równaniach transportu rozwiązywanych iteracyjnie oraz metodę opartą na zlinearyzowanych równaniach transportu;
3. porównanie otrzymanych rozwiązań uzyskanymi wyżej wspomnianymi metodami między sobą i pokazanie, że metoda oparta na linearyzacji równań transportu może być stosowana jedynie dla małych (nie większych niż 0,1) głębokości modulacji wzoru interferencyjnego;
4. pokazanie, że metoda oparta na linearyzacji równań transportu daje niezadawalające rozwiązania dotyczące sinusa przesunięcia fazowego rozkładu pola elektrycznego względem wzoru interferencyjnego w funkcji natężenia pola elektrycznego przyłożonego do struktury, nawet dla małych głębokości modulacji wzoru interferencyjnego;

5. przeanalizowanie zjawiska fotorefrakcyjnego w obecności ruchomego rozkładu wzoru interferencyjnego i zewnętrznego pola elektrycznego w strukturach fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych dla małej (0,1) oraz dużej (1,0) głębokości modulacji wzoru interferencyjnego oraz pokazanie, że wartość amplitudy pola ładunku przestrzennego zależy od różnicy częstotliwości interferujących wiązek i osiąga dla pewnej wartości tej różnicy wartość maksymalną;
6. pokazanie, że metoda oparta na linearyzacji równań transportu daje niezadawalające rozwiązania w wypadku ruchomego rozkładu wzoru interferencyjnego;
7. przebadanie wpływu implantacji protonami o energii 80 keV albo 160 keV i o różnych dawkach na wartości prądu elektrycznego przepływającego przez strukturę fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych w układzie GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As w obecności zewnętrznego pola elektrycznego i promieniowania optycznego oraz porównanie uzyskanych rozwiązań równań transportu z wartościami pomierzonymi – uzyskane różnice nie przekraczały 5%;
8. opublikowanie wyników badań związanych z rozprawą doktorską i na które w niej się powołuje w czterech artykułach naukowych (w *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, w *Optical and Quantum Electronics* oraz dwa w *Photonics Letters of Poland*).

#### Uwagi merytoryczne, słabe strony pracy

Do słabych stron pracy zaliczyć można:

1. ubogą bibliografię jak na rozprawę doktorską – szkoda, że zabrakło tu odwołań do najnowszych wyników badań związanych z tematyką rozprawy (Doktorant nie zacytował nawet swoich trzech innych prac związanych z badaniami struktur fotorefrakcyjnych wielokrotnych studni kwantowych, które zostały opublikowane w ostatniej dekadzie – artykułu B. Jabłoński: Impact of donor compensation ratio on photorefractive two-wave mixing dynamics in multiple quantum wells structures, *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, Vol. 23, No. 03, 1450029, 2014, artykułu B. Jabłoński, E. Weinert-Rączka: The influence of saturation of electron drift velocity on photorefractive effect in GaAs/AlGaAs quantum wells structures, *Optics & Laser Technology*, Vol. 134, 106617, 2021 oraz artykułu pokonferencyjnego B. Jablonski, A. Ziółkowski, M. Wichtowski, E. Weinert-Rączka, Analysis of the space-charge field in photorefractive multiple quantum well structures under a moving gratings for a variable trapping coefficient, *Proceedings of SPIE*, Vol. 11045, Optical Fibers and Their Applications 2018, 110450Q (15 March 2019);
2. brak dla większości przeprowadzonych symulacji weryfikacji doświadczalnej – Doktorant porównał wyniki obliczeń z danymi uzyskanymi drogą doświadczalną jedynie w dwóch wypadkach: dla ruchomego wzoru interferencyjnego porównał sinus kąta przesunięcia między polem ładunku przestrzennego względem wzoru interferencyjnego oraz natężenie prądu płynącego przez strukturę fotorefrakcyjną wielokrotnych studni kwantowych w układzie GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As poddaną implantacji protonami w funkcji zewnętrznego pola elektrycznego;
3. brak w skróconej i wygodnej formie (np. w podsumowaniu) informacji, kiedy można stosować zaproponowaną metodę rozwiązywania równań transportu opisujących generację, rekombinację i transport nośników ładunku dla struktury oświetlonej promieniowaniem optycznym w obecności zewnętrznego pola elektrycznego opartej na linearyzacji tych równań, a kiedy nie należy jej stosować ze względu na niezadawalającą dokładność – informacji na ten temat należy szukać w wielu miejscach rozprawy;
4. brak informacji dla celów porównawczych dotyczącej szczegółów związanych z wykorzystywanym programem komputerowym służącym do znajdowania rozwiązań

- nieliniowych równań transportu – w tym dotyczących języka programowania czy wielowłatkowości, oraz wydajności komputera, na którym były przeprowadzane obliczenia;
5. brak informacji na temat możliwości zastosowania metody opartej na zlinearyzowanych równaniach transportu w bardziej zaawansowanych algorytmach w celu uzyskania krótszego czasu obliczeń, z zachowaniem dokładności uzyskanych wyników, np. informacji, czy wskazane byłoby połączenie metody opartej na zlinearyzowanych równaniach transportu i metody opartej na nieliniowym równaniu transportu, w których pierwsza metoda byłaby wykorzystana do obliczeń wartości początkowych (od których zależy liczba niezbędnych iteracji, a co za tym idzie – czas obliczeń) dla procesu iteracyjnego wykorzystywanego w drugiej metodzie;
  6. myląca nazwa wielkości występująca we wzorze (3.5) oraz w nienumerowanym wzorze na str. 72 – Doktorant nazywa wielkość  $I(z, t)$  natężeniem światła. Jednak z podanych wzorów wynika, że wielkość  $I(z, t)$  jest wielkością zespoloną, a nie rzeczywistą, jak to jest powszechnie przyjęte. Z formalnego punktu widzenia Doktorant zdefiniował w tych wzorach sygnały analityczne (w rozumieniu Denysa Gabora) dla natężenia światła (tj. funkcje, których części rzeczywiste są rzeczywistymi wartościami natężenia światła) – i chyba tak lepiej byłoby wielkość  $I(z, t)$  nazwać;
  7. błędne nazywanie wszystkich równań (3.1a–3.1f) (str. 39) równaniami transportu (str. 40 i 44) – równaniami transportu są jedynie równania (3.1a) i (3.1b); pozostałe równania opisują kolejno gęstości prądu elektronowego i dziurowego, zasadę zachowania ładunku elektrycznego oraz prawo Gaussa;
  8. kontrowersyjne posługiwanie się terminem „światło” dla promieniowania optycznego z zakresu promieniowania podczerwonego (o długości fali 830 nm) – lepiej byłoby używać w tym wypadku terminu „promieniowanie optyczne”.

Do słabych stron pracy należy też jej duża niestaranność pod względem edycyjnym, w tym:

1. brak spisu stosowanych symboli, który w niektórych miejscach ułatwiłby analizę pracy;
2. kompletny chaos w rodzajach czcionek stosowanych dla symboli wielkości fizycznych, opisów znajdujących się w miejscach dolnego indeksu oraz dla wartości wielkości fizycznych – we wzorach Doktorant stosuje czcionkę szeryfową (prawdopodobnie Cambrię), natomiast w treści rozprawy wielokrotnie te same wielkości albo wartości pisane są albo czcionką bezszeryfową (prawdopodobnie Arial), jak pozostała treść rozprawy, albo znacznie częściej czcionką szeryfową. Czemu ma służyć chaos odnośnie czcionek przy zapisie liczby i jednostki w wartościach wielkości fizycznych? Na przykład liczby te na rysunkach pisane są czcionką bezszeryfową, a w tabelach (np. tab. 1.1 i tab. 2.2) – czcionką szeryfową. Jednostki pisane są na rysunkach i czasami w treści rozprawy czcionką bezszeryfową (np. na str. 16), a w większości pracy czcionką szeryfową.
3. kompletny chaos w stylach czcionek stosowanych dla symboli wielkości fizycznych, opisów znajdujących się w miejscach dolnego indeksu oraz w wartościach wielkości fizycznych. Doktorant dla wielkości fizycznych występujących we wzorach najczęściej stosuje ogólnoprzyjęty styl, jakim jest kursywa – jednak nie zawsze. Doktorant miesza style nawet w obrębie jednego wzoru – np. we wzorach (5.7) i (5.11), w których symbol dla stałej siatki raz pisany jest kursywą, a raz pismem prostym, albo we wzorze na str. 52, gdzie również symbol „t” określający czas pisany jest raz kursywą, a raz pismem prostym. Chaos panuje również w wielu miejscach w symbolach funkcji – np. we wzorach (2.5a), gdzie symbol „cos” dla funkcji kosinus pisany jest kursywą (błędnie), a symbol „tg” (funkcja tangens) pismem prostym albo symbol „exp” (funkcja eksponent) w wzorze (3.5) pisany jest kursywą (błędnie), a już w następnym wzorze pismem prostym, a także w rozróżnieniu zmiennych (które przyjęło się pisać kursywą) od opisu, które przyjęło się pisać pismem prostym – tutaj Doktorant prawie zawsze do opisów stosuje niepotrzebnie kursywę. Ale i tu Doktorant jest niekonsekwentny, np. na str. 19



symbol „ $\Gamma$ ” oznaczający minimum centralne pisany jest raz pismem prostym, a innym razem kursywą (błędnie), a symbol „ $L$ ” oznaczający minimum boczne pisane jest kursywą (błędnie). W tabelach 2.2 i 2.3 „ $hh$ ” też raz pisane jest stylem prostym, a innym razem kursywą (błędnie). W kilku miejscach niewłaściwe jest użycie pogrubienia – np. dla symbolu zmiennej skalarnej „ $z$ ” w akapicie przed wzorem (3.6), dla indeksów we wzorach (3.10), (5.1), (5.2) i w nienumerowanych wzorach na str. 46 i 74.

4. stosowanie tych samych symboli do różnych oznaczeń, nawet w obrębie jednego wzoru – np. litera  $h$  pisana kursywą raz oznacza stałą Plancka, innym razem w miejscu indeksu dolnego, że dana wielkość dotyczy dziur, a jeszcze innym razem Doktorant wprowadza opis zawierający dwie litery  $h$  pisanych kursywą – że dotyczy ciężkich dziur (po wprowadzeniu przez Doktoranta symbolu  $h$  pisanego kursywą dla stałej Plancka wystąpienie na pozycji indeksu dolnego symbol  $h$  pisanego kursywą z formalnego punktu widzenia dalej oznacza tę stałą, a nie że dana wielkość dotyczy dziur);
5. nagminne używanie znaku kropki zamiast przecinka jako separatora oddzielającego część całkowitą od ułamkowej w liczbach;
6. brak spacji między miarą i jednostką występujących w wielu miejscach rozprawy – np. na str. 21, 55, 56, 57;
7. nieprawidłowy zapis w kilku miejscach rozprawy heterostruktur tworzących studnie kwantowe – na str. 64 jest GaAs-AlGaAs, a powinno być GaAs/AlGaAs, a na str. 94 jest GaAs-Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As, a powinno być GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As (zapisy GaAs-AlGaAs oraz GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sugerują, że dwa materiały są ze sobą związane lub łączone w jakiejś formie, co może być mylące, jeśli chodzi o opis struktury);
8. stosowanie niewłaściwych symboli – np. w nierówności (3.3) krok przestrzenny oznaczono przez  $dz$  zamiast  $\Delta z$  ( $dz$  sugeruje na różniczkę, a nie krok przestrzenny);
9. wielokrotne stosowanie symbolu łącznika (krótka kreska) w miejscu, gdzie powinna być długa kreska (np. znak minus albo znak myślnika) – np. str. 11 i 21;
10. stosowanie spacji przed przecinkiem – np. na str. 69, albo po nawiasie otwierającym – np. na str. 52;
11. liczne błędy interpunkcyjne, w tym niepotrzebne przecinki oddzielające podmiot od orzeczenia – np. str. 17 po wyrazie przypadków w trzeciej linii nad rys. 1.1 lub na str. 97 w siódmym wierszu od dołu, przecinki przed spójnikiem „a” (w znaczeniu między czymś a czymś) – np. na str. 18, kilkunastokrotnie niepotrzebne przecinki po wyrazie „gdzie” – np. poniżej wzorów (1.1), (1.3), (2.11b), (2.12), (3.3), (3.8b), (3.10), (4.1) i (5.8) (przecinki te powinny być przed wyrazem „gdzie”, ale Doktorant nie traktuje w większości wypadków wzorów jako części zdania, dla których obowiązują zasady interpunkcji – do nielicznych wyjątków, gdzie po wzorach wskazane znaki interpunkcji występują, należą: przecinek po nienumerowanym wzorze na str. 72 oraz przecinek po wzorze (5.5)), brak przecinków oddzielających zwroty zawierające imiesłowy przysłówkowe od reszty zdania – np. w przedostatnim wierszu na str. 31, w 15. wierszu od dołu na str. 92 lub w przedostatnim wierszu przed bibliografią na str. 99, kończenie zdania przecinkiem zamiast kropką – zdanie przed rys. 4.21 na str. 68;
12. brak numerów do wzorów definiujących macierz szybkości procesów transportu i przejść (str. 46 i 74) oraz wektory wzbudzeń (str. 46 i 74), a także do wzoru na str. 72;
13. brak numeru i tytułu tabeli przedstawionej na str. 84;
14. błędy w opisach osi rzędnych lub odciętych wykresów przedstawionych na rys. 5.5, 5.6, 5.8, 5.10, 5.13–5.21 (brak „polskich czcionek”) i rys. 5.6 (jest „Okre” zamiast „Okres”);
15. stosowanie wyrażen typu „na powyższych rysunkach”, „na poniższych rysunkach” albo „poniższej tabeli” zamiast odwołań do numerów rysunków albo tabel – str. 20, 68, 82 oraz 90.

### Podsumowanie

Mgr inż. Błażej Jabłoński postawioną tezę rozprawy udowodnił, a cel i zadania zrealizował. W czasie realizacji rozprawy doktorskiej wykazał aktywność naukową, czego wynikiem są publikacje naukowe i wystąpienia konferencyjne. Jego całkowity dorobek naukowy dostępny w bazie Google Scholar liczy 7 publikacji, w których w jednej jest jedynym autorem i w pięciu pierwszym współautorem, z czego na 4 publikacje powołuje się w rozprawie doktorskiej. Pomimo wskazanych w recenzji usterek, stwierdzam, że **praca przedstawiona przez mgra inż. Błażeja Jabłońskiego spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim**, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.) oraz **wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

