

Warszawa, 12 lutego 2024

Prof. dr hab. inż. Mirosław Karpierz  
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej

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

Rozprawa doktorska mgra inż. Błażeja Jabłońskiego dotyczy analizy teoretycznej zjawiska fotorefrakcyjnego w półprzewodnikowych strukturach wielokrotnych studni kwantowych oświetlanych obrazem interferencyjnym dwóch fal świetlnych. Zjawisko fotorefrakcyjne jest jednym z ciekawszych zjawisk optyki nieliniowej związanym z wywoływaniem zmian współczynnika załamania ośrodka pod wpływem niejednorodnego oświetlenia. Jego zaletą jest to, że występuje dla wyjątkowo niskich, jak na zjawiska optycznie nieliniowe, natężeń światła. Wadą natomiast jest to, że pojawienie się efektu wymaga dosyć długiego czasu. W przypadku klasycznie badanych kryształów fotorefrakcyjnych, jak na przykład niobian litu, czasy te są nawet rzędu pojedynczych sekund. Prace prowadzone przez zespół profesor Ewy Weinert-Rączki dotyczą bardzo atrakcyjnego pod względem aplikacyjnym ośrodka, którego czasy odpowiedzi podawane są w mikrosekundach. Dlatego też rozprawa doktorska mgra inż. Błażeja Jabłońskiego ma bardzo aktualną tematykę a jej wyniki są istotne dla dalszych badań eksperymentalnych.

Celem pracy było „uzupełnienie wyników wcześniejszych prac dotyczących mieszania dwufalowego w strukturach fotorefrakcyjnych z wielokrotnymi studniami kwantowymi oraz udoskonalenie metod ich analizy”. Cel ten został sformułowany i rozbudowany w pięciu szczegółowych zadaniach (na stronach 11-12), które zostały w pełni zrealizowane. Podana została też teza pracy: „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”. Poprawna rozbudowa modelu powinna dawać dokładniejsze wyniki i dlatego tak sformułowana teza wydaje się zbyt ogólna.

Rozprawa liczy 112 stron i na początku zawiera rozdziały wstępne z podstawowymi informacjami opisującymi zjawisko fotorefrakcyjne, półprzewodnikowe studnie kwantowe oraz model stosowany do opisu badanego zjawiska. Następnie w kolejnych rozdziałach zamieszczone są oryginalnie uzyskane wyniki obliczeń dla konfiguracji ze stacjonarnym rozkładem natężenia światła a następnie w układzie z przesuwającymi się prążkami (jako wynik interferencji dwóch fal o różnej częstotliwości). Do rozprawy dołączony został również dodatek dotyczący implantacji protonami półprzewodnikowych struktur wielokrotnych studni kwantowych. Są to oryginalne wyniki doktoranta, które nie są zawarte w celu pracy, lecz powiązane z jej tematyką i istotne z punktu widzenia tworzenia analizowanych struktur na potrzeby badań eksperymentalnych. Rozprawa zawiera podsumowanie, spis rysunków i tabel, natomiast bibliografia jest umieszczona na końcu rozdziałów.

Wyniki obliczeń były prowadzone dla studni kwantowych w AlGaAs/GaAs i długości fali  $\lambda=830\text{nm}$ . W obliczeniach wykorzystywany był jednowymiarowy model transportu bazujący na modelu Vinetskiego i Kukhtareva. Wyniki głównie dotyczą rozkładu pola elektrycznego w strukturze i czasu narastania zjawiska po włączeniu oświetlenia. Analizowany był wpływ na zjawisko parametrów układów między innymi takich jak wartość zewnętrznego pola elektrycznego, widzialność prążków interferencyjnych, ich okres przestrzenny, współczynnik kompensacji donorów. Ciekawym i ważnym wynikiem jest także uwzględnienie w modelu nieliniowego transportu elektronów. Istotnym elementem pracy jest porównanie modelu przybliżonego, dającego wyniki analityczne z dokładnymi wynikami numerycznymi.

Na podkreślenie zasługują również wyniki wyliczeń dotyczące optymalnej szybkości przesuwania się prążków interferencyjnych (związanej z różnicą częstotliwości interferujących fal), która maksymalizuje amplitudę pola elektrycznego wewnątrz struktury (maksymalizuje efekt nieliniowy). Istotnym osiągnięciem pracy zawierającej wyniki obliczeń teoretycznych jest porównanie symulacji z wynikami eksperymentalnymi opublikowanymi w pracy D.D.Nolte’a [5.5]. Co prawda nie udało się uzyskać zgodności dla dużych prędkości przesuwania siatki ale eksperyment był przeprowadzony dawno w innym ośrodku i trudno zweryfikować wszystkie

jego uwarunkowania. Szkoda, że nie można było wykorzystać zaproponowanej metody do porównania z innymi pomiarami doświadczalnymi.

Praca jest napisana w miarę starannie choć stosowanie wielu oznaczeń i symboli prowadzi miejscami do nieścisłości i niepotrzebnych skrótów. Dla przejrzystości wywodu rozkład pola elektrycznego w strukturze mógłby się pojawić na początku a nie dopiero na rys. 4.17. Można by na jego podstawie wprowadzić i poprawnie zdefiniować (i nazwać) odpowiednie wartości pola elektrycznego, w tym rozróżnić pomiędzy wartościami oscylacji przestrzennych pola a amplitudą tych oscylacji (dla większej wartości widzialności prążków oscylacje nie są harmoniczne). A tak na stronie 49 zdefiniowana jest „amplituda  $E_{sc}$ ” jako „maksymalna wartość w periodycznym rozkładzie pola ładunku przestrzennego uzyskanego metodą numeryczną” po czym na rys. 4.2 jest to już amplituda wyliczona analitycznie (i oczywiście bez stałej wartości pola zewnętrznego, choć definicja formalnie ją zawiera), na rys. 4.11 jest symbol  $E_{1sc}$  a we wzorze (5.5) zarówno  $E_{sc1}$  jak  $E_{1sc}$ . Maksymalne wartości pola elektrycznego w podpisie rys. 3.2 są określone jako „pola ładunku przestrzennego”, w podpisie rys.4.1 jako „amplituda pola ładunku przestrzennego”, dopiero pod rys.4.11 podany jest poprawny zapis. Dla osób zajmujących się tą tematyką jest to być może oczywiste, ale w rozprawie doktorskiej wprowadza pewne zamieszanie terminologiczne.

W układzie równań (3.2a-3.2f) występują błędy: w niektórych wzorach w miejsce  $j/q$  wprowadzono  $j$ , a w równaniu Poissona jest zły znak i pierwsza zamiast drugiej pochodnej.

Analizując wpływ transportu nieliniowego na amplitudę pola na str.57 podane jest, że amplituda ta maleje powyżej wartości krytycznej  $E_c=3,5\text{kV/cm}$ , podczas gdy na rys.4.6 spadek tej amplitudy zaczyna się już dla mniejszego pola (około  $2,5\text{ kV/cm}$ ).

Podsumowując, powyższe krytyczne uwagi nie umniejszają znaczenia i jakości zawartych w rozprawie wyników. Praca zawiera szereg rzetelnie przeprowadzonych obliczeń szczegółowo i prawidłowo opisanych oraz zinterpretowanych. Mają one aspekt nie tylko poznawczy ale przede wszystkim aplikacyjny. Doktorant wykazał się wiedzą o zjawiskach i mechanizmach zachodzących w badanych ośrodkach a także umiejętnościami w operowaniu modelami matematycznymi i obliczeniach numerycznych.

Spośród uzyskanych wyników na szczególne wyróżnienie zasługują wykazanie wpływu na opis zjawiska nieliniowego transportu elektronów oraz wyznaczenie optymalnej wartości prędkości przesuwania się prążków interferencyjnych.

**Mając na uwadze rzetelność przeprowadzonych badań i naukową wartość otrzymanych wyników uważam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę zatem o dopuszczenie magistra inżyniera Błażeja Jabłońskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

  
prof. dr hab. inż. Mirosław Karpierz