

Prof. dr hab. inż. Vitalii Dugaev
Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej
Politechniki Rzeszowskiej
Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

Rzeszów, 14 maja 2015 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Pawła Zięby
pt. "Aktywne i pasywne elementy mikroelektroniki i optyki giga- i
terahercowej"**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgra Pawła Zięby są zjawiska optyczne, związane, z jednej strony, z generacją fal elektromagnetycznych w przedziale częstotliwości terahercowej, a z drugiej strony, z rozchodzeniem fal elektromagnetycznych w pewnych ośrodkach ciągłych, które można scharakteryzować przez ujemne przenikalności elektryczne i magnetyczne. Ten kierunek badań wzbudza obecnie duże zainteresowanie fizyków i inżynierów, ponieważ otwiera możliwości otrzymania nowych metod: generacji fal terahercowych oraz materiałów nazywanych metamateriałami, które w pewnym sensie akumulują w sobie fale elektromagnetyczne.

Praca doktorska Pana Pawła jest pracą teoretyczną, która składa się ze wstępu, dwóch zasadniczych części z obliczeniami, prezentacji wyników i ich dyskusji, podsumowania rezultatów całej pracy oraz trzech dodatków. Przedstawiona jest także lista publikacji i wystąpień konferencyjnych, spis rysunków i tabel oraz bibliografia do pracy doktorskiej. Cała praca zawiera 106 stron tekstu, w tym około 20 stron stanowią autorskie kody źródłowe programów do obliczeń numerycznych wykonanych przez Pana Pawła Ziębę.

Praca została wykonana w Katedrze Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Rzeszowskiego pod kierunkiem Prof. Igora Tralle. Tekst pracy jest napisany bardzo dobrze. Od samego początku czytania pracy istnieje wrażenie, że autor bardzo dobrze zna literaturę i aktualny stan wiedzy w dziedzinie, w której pracuje. Lista cytowanych artykułów, książek, sprawozdań z innych ośrodków nauki i laboratoriów stanowi 76 punktów. Trzeba zaznaczyć, że wśród tych cytowanych prac są prace z ostatnich lat opublikowane w bardzo wysoko renomowanych czasopismach takich jak Physical Review Letters, Nature, Science i inne. Ten fakt potwierdza, że temat pracy przyciąga obecnie dużą uwagę i zainteresowanie fizyków. Własne publikacje Pana Pawła Zięby to 5 artykułów, w tym jeden w Journal of Applied Physics, dwa artykuły w Physics Letters A, a jeden w Journal of Mathematical Physics. Pan Paweł Zięba uczestniczył w ośmiu międzynarodowych konferencjach naukowych i szkołach fizyki, na których przedstawił 3 ustne referaty i 5 posterów.

Wstęp do pracy opisuje ogólny stan wiedzy dotyczącej generacji promieniowania terahercowego, rosnące znaczenie tego przedziału częstotliwości we współczesnej nauce i technice. Opisane są także istniejące źródła i detektory promieniowania terahercowego. W tej wstępnej części zostały sformułowane najważniejsze cele wykonanej pracy.

W rozdziale 1 pierwszej części pracy są opisane undulatory jako jedno z podstawowych źródeł promieniowania terahercowego. Potem opisano zjawisko Gunna w półprzewodnikach, takich jak GaAs, GaN, InP i innych. Wiadomo, że w wyniku ujemnej rezystancji różniczkowej w silnym polu elektrycznym, generują się oscylacje prądu, których częstość zależy od pewnych właściwości materiału półprzewodnikowego. Fizyka powstawania „domen Gunna” i związanych z ich ruchem oscylacji zostały opisane w pracy bardzo szczegółowo. Następnie przedstawiono sam pomysł wykorzystania zjawiska Gunna do generacji fal elektromagnetycznych w sposób, pewną miarą podobny do undulatora. Został przedstawiony model do obliczeń i symulacji układu klasycznych nieliniowych oscylatorów oddziaływających z zewnętrznym wymuszającym polem elektrycznym pewnej częstości. Bardzo ciekawym jest przedstawienie wyników obliczeń numerycznych w postaci portretów fazowych we współrzędnych amplituda-faza dla pojedynczych oscylatorów. Głównym wynikiem tego rozdziału jest znaleziony związek między emitowaną mocą promieniowania a liczbą oscylatorów N .

W rozdziale 2 przedstawiono wyjaśnienie możliwości powstania stanu nadpromienistego w badanym układzie zamodelowanym przez zbiór oddziałujących ze sobą oscylatorów. Analiza opiera się na wykorzystaniu modelu Dicke’a, który właśnie przewidywał możliwość istnienia stanu nadpromienistego. Model obliczeń jest podobny do tego, który był wykorzystany w poprzednim rozdziale, ale oprócz pola wymuszającego mikroundulatora dodatkowo został uwzględniony wpływ pola związanego z emitowanym promieniowaniem. Rezultatem symulacji numerycznych jest ewolucja w czasie zbioru oscylatorów zilustrowana jako sekwencja portretów fazowych. Sekwencja ta pokazuje pojawienie się pewnej koherencji w zbiorze oscylatorów. Cały ten model i wyniki odpowiadają elektronom w mikroundulatorze w arsenku galu z siatką elektrod umieszczonych na warstwie półprzewodnika. Częstość promieniowania uwzględniająca parametry materiału oraz geometrię układu wynosi około trzech dziesiątych THz.

W części drugiej rozprawy, którą rozpoczyna **rozdział 3**, rozpatrywane są pasywne elementy optyki giga- i terahercowej. Został tu przedstawiony pomysł tworzenia metamateriałów w postaci kompozytu składającego się z trzech składników, co w konsekwencji umożliwia jednocześnie uzyskanie ujemnej wartości przenikalności elektrycznej oraz magnetycznej. Rozdział zaczyna się od dokładnego opisu tego, czym są fizycznie metamateriały, historii zagadnienia i istniejących metod wytwarzania metamateriałów. Model zaproponowany w pracy ma zastosowanie do kompozytu składającego się z trzech różnych nanocząstek. Jednym z zaproponowanych składników są sferyczne nanocząstki, jednorodnie namagnesowane, ale bez uporządkowanych własnych momentów magnetycznych w zerowym polu magnetycznym. Efektywna przenikalność magnetyczna tych nanocząstek jest opisana za pomocą równania Landaua-Lifshitz’a opisującego dynamikę momentu magnetycznego cząstki w zmiennych polach magnetycznych z uwzględnieniem jego możliwej całkowitej relaksacji. Przenikalność elektryczna poszczególnych składników została opisana z wykorzystaniem modelu Drudego dla stałej dielektrycznej. Jako kolejny składnik (nanocząstek) zaproponowano wykorzystanie HgCdTe, który jest półprzewodnikiem i pozwala na dowolną zmianę efektywnych parametrów całego układu nanocząstek, w tym także przenikalności

elektrycznej i magnetycznej. Do obliczenia przenikalności magnetycznej kompozytu wykorzystano wzór, który opisuje pewne uśrednienie przenikalności wszystkich składników. Potem przez symulacje komputerowe z wykorzystaniem parametrów użytych materiałów obliczono obszary we współrzędnych temperatura-koncentracja kadmu i znaleziono optymalne wartości parametrów.

W podsumowaniu zaznaczono, że udało się rozwiązać postawione zadania. Zaproponowano konstrukcję generatora fal terahercowych i zaproponowano koncepcję wytwarzania metamateriałów z nanocząstek różnych materiałów – składników kompozytu.

Cała praca doktorska sprawdziła na mnie bardzo dobre wrażenie, ponieważ jest logicznie skoncentrowana na rozwiązaniu pewnych dobrze sformułowanych i, trzeba zaznaczyć, dość trudnych zadań. Praca jest dobrze napisana, a przedstawione wyniki są bardzo dobrze zaprezentowane i opisane, dlatego nie mam żadnych wątpliwości, co do ich wiarygodności.

Moja uwaga krytyczna dotyczy drugiej części pracy. Ponieważ wykorzystany model opisuje kompozyt, można spodziewać się, że w takim materiale występują efekty nieuporządkowania i przestrzenne fluktuacje wszystkich możliwych parametrów. Oczywiście, jest to związane z możliwą różnicą rozmiarów nanocząstek, ich kształtu i koncentracji składników, itp. Z tego powodu byłoby dobrze przeanalizować wpływ fluktuacji parametrów na właściwości metamateriału. W związku z tym głównym pytaniem jest, czy nie pojawi się istotne rozpraszanie fal elektromagnetycznych w przypadku zaproponowanego materiału?

Konkluzja

Reasumując, pragnę stanowczo stwierdzić, iż wymienione powyżej z obowiązku recenzenta mankamenty rozprawy Pana mgra Pawła Zięby nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę tej pracy. Rozprawa napisana jest w swojej zasadniczej części jasno i zrozumiale.

Szczegółowe zapoznanie się z treścią rozprawy oraz pokaźny dorobek naukowy Pana magistra utwierdziły mnie w przekonaniu o jego wysokich kwalifikacjach. Praca doktorska Pana mgra Pawła Zięby, wykonana pod opieką naukową promotora - Pana Profesora Igora Tralle - jest oryginalnym rozwiązaniem kilku zagadnień naukowych, stanowiących **istotny wkład** do obszaru wiedzy, który można określić jako **ilościową i jakościową analizę możliwości konstruowania generatorów fal terahercowych oraz metamateriałów-kompozytów z nanocząstek różnych składników**. Pokazuje ona także jego ogólną wiedzę w dziedzinie nowoczesnej fizyki ciała stałego i symulacji komputerowych z wykorzystaniem autorskich programów komputerowych. Rozprawa charakteryzuje się indywidualnym wkładem Autora do rozwiązania omówionych wyżej zagadnień, a zatem spełnia wszystkie wymagania Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych. Niniejszym wnoszę o dopuszczenie Pana **mgr Pawła Zięby do dalszych kroków przewodu doktorskiego**.

