

Warszawa, 10.01.2025

prof. dr hab. Jerzy Łusakowski
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
jerzy.lusakowski@fuw.edu.pl
tel.: 22 55 32 770

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Kałuży

“Dyfrakcyjne elementy optyczne umożliwiające przestrzenną multipleksację i demultipleksację wiązek promieniowania terahercowego”

Rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Kałuży pt. “Dyfrakcyjne elementy optyczne umożliwiające przestrzenną multipleksację i demultipleksację wiązek promieniowania terahercowego” poświęcona jest projektowaniu i implementacji torów optycznych służących łączeniu (multipleksacja) i rozdzielaniu (demultipleksacja) wiązek promieniowania elektromagnetycznego o częstościach należących do dolnego pasma widma THz (ok. 100 – 200 GHz).

Zagadnienia poruszane w rozprawie stanowią bardzo istotną część badań, prowadzonych na całym świecie, związanych z zastosowaniem promieniowania THz. Po pionierskich początkach intensywnego rozwoju technologii terahercowych na przełomie XX i XXI wieku, gdy się wydawało, że promieniowanie THz znajdzie bardzo szerokie zastosowania, wysiłki badaczy (pomijam tu badania podstawowe) skoncentrowały się na realnych możliwościach aplikacyjnych, którymi okazały się: wytwarzanie w technologii półprzewodnikowej detektorów i emiterów promieniowania THz oraz szybkiej elektroniki, obrazowanie i zagadnienia związane z telekomunikacją w paśmie THz. To ostatnie zagadnienie jest tematem omawianej rozprawy.

Telekomunikacja w paśmie THz znajduje się w początkowej fazie rozwoju, z czym wiąże się konieczność przetestowania licznych koncepcji, z których tylko niewielka część zostanie objęta przyszłymi zastosowaniami w skali przemysłowej. Tym niemniej, wysiłek włożony w testowanie nowych rozwiązań jest konieczny, gdyż tylko w ten sposób można doprowadzić do wyłonienia się kierunków rozwoju prowadzących ostatecznie do zastosowań komercyjnych. Przedstawiona rozprawa dotyczy generalnie takiego właśnie problemu: testowania koncepcji, które mogą się okazać kluczowe dla rozwoju terahercowych technologii komunikacyjnych.

W tym kontekście należy z uznaniem odnieść się do treści rozprawy ze względu na jej bardzo szeroki zakres tematyczny i zastosowaną metodologię badań. Poruszony w rozprawie temat został

precyzyjnie sformułowany, badania właściwie zaprojektowane i przeprowadzone. Rozprawa stanowi spójną całość, która z pewnością posłuży innym badaczom rozwijającym technologie komunikacyjne w paśmie THz. .

Rozprawa rozpoczyna się Wstępem i rozdziałem definiującym jej cel, zakres i tezę, po czym następuje omówienie (z konieczności, skrócone) aktualnego stanu badań związanych z rozpatrywanymi w pracy zagadnieniami, a w szczególności telekomunikacją THz, właściwościami materiałów w paśmie THz i omówieniem technologii druku przestrzennego. Sformułowany w rozdziale 2 cel rozprawy został zrealizowany poprzez działania o charakterze numerycznym i pomiarowym opisane w rozdziałach 4 – 6.

Czwarty rozdział zawiera opis zastosowanej metodologii. Nasuwają się tu następujące pytania. Po pierwsze, czy i w jaki sposób zostały uwzględnione straty wynikające z odbić Fresnela (czynnik $R(n)$ w równaniu 4.1 i 4.4)? Po drugie, czy możliwe było przeprowadzenie pomiarów na próbkach o kształcie nieznacznie klinowym, co w mogłoby wyeliminować wpływ interferencji na spektrum. Z kolei, nie jest jasne, czy całość przeprowadzonych obliczeń została wykonana za pomocą programu LightSword, czy też Autor stosował własne procedury numeryczne (ewentualnie modyfikując program firmy Ortech). Można przypuszczać, na podstawie tekstu, że LightSword służył do symulacji propagacji światła, natomiast modelowanie rozkładów opóźnienia fazowego odbywało się przy użyciu dwóch innych procedur, ale nie jest to oczywiste.

Opis badań materiałowych stanowi treść rozdziału 5. Imponująca jest długość listy przebadanych materiałów oraz systematyczne badania wpływu parametrów druku przestrzennego na ich właściwości optyczne (temat ten jest także szczegółowo omówiony w Aneksie). Rozległe badania pozwoliły na określenie optymalnych parametrów druku elementów optycznych wykorzystanych następnie do wykonania elementów układów pomiarowych. Wśród przebadanych materiałów odlewniczych znajdują się czekolady i mydła. Interesujące byłoby zamieszczenie informacji, czy badania tych materiałów wykonano dla (zrozumiałej, oczywiście) zabawy, czy też Autor uważa, że są to materiały o znaczeniu technologicznym dla zastosowań w dziedzinie THz?

Kwintesencją rozprawy jest rozdział 6., w którym spotykają się wszystkie elementy konieczne do przeprowadzenia zamierzonych pomiarów: modelowanie struktur SIMO i MIMO, symulacja propagacji światła z ich udziałem, konstrukcja układu pomiarowego, przeprowadzenie pomiarów i ich analiza. Całość pozwoliła na sformułowanie tezy rozprawy o możliwości multipleksacji i demultipleksacji przestrzennej wiązek monochromatycznego promieniowania THz w układzie optycznym przy wykorzystaniu struktur dyfrakcyjnych wykonanych metodą druku przestrzennego. Treść rozdziału 6. jest odzwierciedleniem wielkiej staranności, z jaką prowadzono badania. Ważne jest

zwłaszcza porównanie wyników symulacji numerycznych i pomiarów, które pozwala na wyciągnięcie istotnych wniosków co do kierunków dalszych prac. Dane pomiarowe zamieszczone w tym rozdziale świadczą o wielkiej staranności (precyzji) konstrukcji układów oraz pozwalają docenić czas potrzebny na zgromadzenie danych (można się tylko domyślać wielogodzinnych cykli pracy skanerów). Końcowy efekt w postaci przedstawienia danych pomiarowych wytworzonych w układzie realizującym multi- i demultipleksację uważam za niezwykle interesujące osiągnięcie.

Na podkreślenie zasługuje także bardzo rozległa bibliografia (192 pozycje), która sama w sobie może służyć jako baza danych na temat badań dotyczących omawianych w rozprawie zagadnień.

Niedosyt budzi bardzo interesująco się zapowiadający – sądząc z tytułu - rozdział 7.: Analiza niepewności pomiarowych. Zwykle pod takim określeniem kryje się analiza podająca ilościowo rozmiar niepewności. Rozdział 7 jest niestety poświęcony jedynie jakościowemu opisowi trudności pojawiających się przy prowadzeniu pomiarów i jakościowemu opisowi istniejących źródeł niepewności.

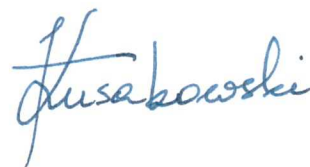
Autor wielokrotnie stosuje określenie „szum” do bocznych maksimów obrazu dyfrakcyjnego, mając zapewne na myśli, że są to efekty niepożądane. Nie jest to jednak szum w znaczeniu statystycznym, a wynik dyfrakcji na danej strukturze i w związku z tym te boczne maksima nie powinny być określane mianem szumu. Przyczyna pojawiania się bocznych maksimów została ogólnie określona jako wynik niepoprawnego ugięcia padającego promieniowania (którego część nie znalazła się w głównym kanale optycznym – str. 74) oraz nieznacznego niedopasowania profili fazowych do stosowanych częstotliwości (str. 74), ale nie został zaproponowany sposób ich eliminacji (o ile jest w ogóle możliwy w obrębie klasy badanych struktur dyfrakcyjnych). Być może, pojawianie się bocznych maksimów jest ceną, jaką trzeba zapłacić za możliwość pozaosiowego sterowania wiązkami, a zagadnienie eliminacji bocznych maksimów będzie rozważane w dalszych badaniach.

Odnosząc się do niedostatków edytorskich rozprawy, wymienić należy drobne uchybienia:

- brak słowniczka zastosowanych skrótów, co bardzo utrudnia lekturę, zwłaszcza początkowo, gdzie skrótów te pojawiają się w znacznej ilości;
- brak wyraźnego oddzielenia podpisów pod rysunkami od głównego tekstu. Podpisy powinny być np. w formie akapitów o mniejszym odstępnie między liniami albo zapisane inną czcionką;
- pojawiają się błędy interpunkcyjne i literówki oraz zdania zawierające niefortunnie użyte imiesłowy czynne (np. na str. 30: System MIMO może zostać zaimplementowany korzystając z różnych metod).
- zastrzeżenie budzi użyte często sformułowanie „pomiarów eksperymentalnych”, czy „eksperymentalny układ pomiarowy”. Rozumiejąc intencje Autora, chciałbym zauważyć, że pomiary są zawsze wynikiem eksperymentu, podobnie układ pomiarowy służy do przeprowadzenia eksperymentów. Użyte

sformułowania są zatem typu „masło maślane”.

Podsumowując, przedstawiona rozprawa należy według mnie do zasługujących na najwyższą ocenę ze względu na zakres i staranność przeprowadzonych badań, wielość technik numerycznych i pomiarowych, których zastosowanie było konieczne do jej realizacji i interesujące wyniki otwierające pole do dalszych badań. Rozprawa spełnia w mojej ocenie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony oraz stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

A handwritten signature in blue ink, reading "Husakowski". The signature is written in a cursive style with a large initial 'H'.