

Warszawa, 13 grudnia 2024r.

Prof. dr hab. inż. Jacek Marczewski
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki
Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa
jacek.marczewski@imif.lukasiewicz.gov.pl

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

**pt. Dyfrakcyjne elementy optyczne umożliwiające
przestrzenną multipleksację i demultipleksację wiązek
promieniowania terahercowego**

autor: mgr inż. Mateusz Kałuża

praca wykonana na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej,
współpraca WAT

promotor: dr hab. inż. Agnieszka Siemion, prof. PW

Recenzowana Rozprawa dotyczy różnorodnych metod modelowania i wytwarzania dyfrakcyjnych elementów optycznych (DOE) umożliwiających multipleksację i demultipleksację sygnałów w pasmie THz. Opisano układ MIMO (multiple input multiple output), zrealizowany przy za pomocą wytworzonych elementów i zapewniający separację kanałów o bardzo zbliżonej częstotliwości. Przeprowadzono rozległe prace projektowe wzbogacone o badania materiałowe oraz zoptymalizowano parametry wytwarzania DOE metodami druku 3-D.

Przedstawiona do recenzji praca liczy 175 stron, zaś bibliografia zawiera blisko dwieście pozycji. Napisana została w języku polskim, zwięźle i przejrzysto, a jej układ nie budzi istotnych zastrzeżeń.

Zakres Rozprawy obejmuje wiele różnych zagadnień wymagających:

- biegłej znajomości szczegółowych zagadnień z zakresu optyki dyfrakcyjnej;
- umiejętności wykorzystania zaawansowanych metod modelowania przestrzennego;
- dogłębnej znajomości technologii druku 3-D;
- wykorzystania spektroskopii TDS (Time Domain Spectroscopy) do charakteryzacji właściwości optycznych materiałów;
- umiejętności prowadzenia eksperymentów pomiarowych w zakresie częstotliwości terahercowych.

Zdaniem recenzenta pracę należy czytać w kontekście wcześniejszych osiągnięć Zespołu, w którym była realizowana, a mianowicie rozpraw doktorskich dr. Martynty Rachoń (2020) i dr. Pawła Komorowskiego (2021). Stanowi ona bowiem dalszy krok w rozwoju elementów optyki dyfrakcyjnej THz ukierunkowanych na zwiększenie przepustowości krótkozasięgowych łączy przewidzianych do zastosowania w sieciach 6G.

Pierwszy rozdział Rozprawy to wprowadzenie, w którym autor skonkretyzował i uzasadnił motywy prowadzenia prac opisanych w Rozprawie.

Drugi rozdział zawiera cel pracy jakim jest optymalizacja projektowania i wytwarzania wydajnych elementów dyfrakcyjnych realizujących multipleksację i demultipleksację promieniowania THz. Szczególny nacisk położono na dogłębną optymalizację wielu procesów cząstkowych (symulacje numeryczne i algorytmy projektowe, modelowanie rozkładów fazy, dobór właściwego materiału elementów DOE, wybór parametrów druku przestrzennego oraz weryfikację teoretyczną i eksperymentalną wybranych rozwiązań. Główna teza Rozprawy stanowi, że: „**Możliwe jest opracowanie wielokanałowego sytemu transmisji sygnałów opartych o dyfrakcyjne elementy optyczne realizujące funkcjonalności multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz**”.

Trzeci rozdział Rozprawy stanowi opis kluczowych zagadnień omawianych w pracy z uwzględnieniem kontekstu literaturowego. Zwraca uwagę, że ilość używanych w pracy kilkuliterowych skrótów jest poważna i jeśli czytelnik przegapił ich pierwsze użycie (gdzie zostały rozwinięte), to pomocą byłby dodatkowy ich indeks na początku Rozprawy.

Rozdział czwarty, to opis metodyki. Pierwszą jego częścią jest opis techniki TDS. Opis tej niezwykle ważnej dla recenzowanej pracy metody pomiarowej został przez Autora maksymalnie uproszczony. W kontekście bogatej literatury przedmiotu stwierdzenie o użyteczności metody od częstotliwości 50 GHz wydaje się nieuprawnione. Z pożytkiem dla pracy można było ten rozdział rozszerzyć wykorzystując informacje dostępne w źródłach internetowych np. <https://thz.yale.edu/sites/default/files/tutorial.pdf>. Następną część rozdziału, to kluczowy dla zrozumienia pracy opis dyfrakcyjnych elementów optycznych, symulacji numerycznych propagacji światła, algorytmów używanych do symulacji numerycznych oraz krótkiej informacji o addytywnej metodzie wytwarzania DOE. W następnych, bardziej szczegółowych, rozdziałach informacje te bywają powtarzane.

Rozdział piąty (wzbogacony szeregiem załączników znajdujących się w Aneksie), to badania materiałowe służące znalezieniu optymalnego materiału do wytwarzania DOE spełniającego wymagania aplikacyjne określone w Rozprawie. Kluczowe są tu wyniki pomiarów TDS, stąd też wyrażona uprzednio refleksja Recenzenta dotycząca rozwinięcia opisu tej techniki. Następną grupą eksperymentów, to poszukiwanie optymalnych parametrów druku 3-D do wytwarzania DOE z wybranych materiałów (na stronie 60 brak fragmentu tekstu). Elementy wytworzone w wybranej technologii zostały następnie zmierzone. Zdaniem Recenzenta to jedna z najbardziej istotnych (i niewątpliwie eksperymentalnie wielce pracochłonnych) części pracy.

Rozdział szósty opisuje system MIMO zrealizowany (przy użyciu elementów multipleksującego i demultipleksującego po obu stronach łącza) dla dwóch kanałów w pobliżu dolnej granicy częstotliwości uznawanych za zakres terahercowy. Wybór tego zakresu nie jest jasny dla recenzenta ale zapewne był związany z parametrami dostępnych źródeł (diod IMPATT). W rozdziale najpierw opisano sposób projektowania elementów multipleksujących (MISO), a więc w kolejności: wyniki symulacji numerycznych prowadzące do map fazowych, tworzenie modeli 3-D struktur, ostateczny wybór materiału i parametrów druku a także weryfikację eksperymentalną wytworzonych struktur. W dalszej części rozdziału szóstego zawarto zestaw identycznych przedsięwzięć dla elementów demultipleksujących (SIMO). Rozdział kończy opis zbudowanego kompletnego łącza MIMO. Wobec planowanego małego odstępu pomiędzy częstotliwościami separowanych kanałów (niecały GHz) do demultipleksacji użyto dwóch DOE (w postaci DOE realizującego soczewkę kinoformową oraz drugiego elementu - w postaci fazowej dyfrakcyjnej siatki binarnej). Uzyskane wyniki stanowią bez wątpienia „crème de la crème” pracy i stanowią udokumentowanie potwierdzenia słuszności postawionej w Rozprawie tezy. Należy sądzić, że zestawione łącze będzie służyć do następnych eksperymentów polegających na transmisji cyfrowej z jego użyciem, pomiarów dotyczących przepustowości łącza i stopy błędów transmisji.

Rozdział siódmy zawiera analizę niepewności pomiarowych związanych zarówno z etapem symulacji i modelowania struktur a także ich wytwarzania. Następnie opisano pokrótce źródła błędów pomiarów TDS (choć technika ta została potraktowana i w tym przypadku niezwykle skrótowo). Krótko też opisano ew. niepewności związane z pomiarami eksperymentalnymi. Lektura tego rozdziału pozostawia pewien niedosyt.

Rozdział ósmy stanowi podsumowanie. Nie uniknięto w tym fragmencie pewnych powtórzeń prawie in extenso. Rozdział kończy podkreślenie osiągnięcia zamierzonych celów i potwierdzenia słuszności tezy Rozprawy. Następnie zamieszczona jest lista publikacji własnych i doniesień konferencyjnych z podziałem na te związane blisko z Rozprawą oraz poboczne. Wszystkie publikacje są zbiorowe ale w tych najściślej związanych z pracą doktorant występuje jako pierwszy autor. Na uwagę zasługuje spora ilość doniesień na renomowanych konferencjach z cyklu IRMMW-THz. Szkoda, że spisu nie uzupełniono o sygnatury DOI (dotyczy to także bibliografii).

Ostatnią częścią Rozprawy są Aneksy zawierające informacje szczegółowe niewymienione w głównej części pracy oraz Bibliografia.

Jak wspomniano na wstępie niniejszej recenzji, Recenzent zaznajomił się także z rozprawami doktorów Martyny Rachoń i Pawła Komorowskiego, które powstały w ostatnich latach w ramach prac tego samego Zespołu. W pewnym sensie były one prekursorami recenzowanej Rozprawy. Doktorat dr Rachoń dotyczył technik korekcji fazy struktur DOE-THz. Głównym celem pracy była analiza wpływu korekcji fazy na wydajność DOE pracujących w oświetleniu monochromatycznych THz i dotyczył zasadniczo poosiowej koncentracji energii wiązki. Drugi doktorat - Pawła Komorowskiego - dotyczył zagadnień znacznie bliższych tematycznie recenzowanej pracy a mianowicie multipleksacji promieniowania THz z wykorzystaniem nie-poosiowych struktur DOE. W recenzowanej obecnie pracy znajdują się liczne odniesienia do różnych publikacji dr. Komorowskiego, choć nie do samego doktoratu, który był wydany przez Wydawnictwo PW w trybie dostępu do informacji publicznej. Po analizie porównawczej prac, Recenzent stwierdza, że Autor recenzowanej obecnie pracy we właściwy sposób korzystał z dostępnych zasobów wiedzy zamieszczając właściwe odniesienia do ogólnodostępnej literatury (w tym do prac dr. Komorowskiego) znajdującej się we światowym obiegu.

Wyniki prac pokazanych w Rozprawie zostały częściowo opublikowane w szeroko cytowanych czasopismach. Praca zawiera kilka mało istotnych błędów edytorskich, jest napisana w sposób bardzo konkretny i zrozumiały. **Stwierdzam, że Rozprawa „Dyfrakcyjne elementy optyczne umożliwiające przestrzenną multipleksację i demultipleksację wiązek promieniowania terahercowego” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym obowiązującą aktualnie w Polsce i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Jednocześnie, biorąc pod uwagę poziom recenzowanej Rozprawy, a przede wszystkim trudność rozwiązanych problemów oraz uwzględniając dorobek naukowy jej Autora (w postaci licznych publikacji w wysoko notowanych czasopismach, komunikatów na renomowanych konferencjach i udziału w licznych projektach) **wnioskuję o wyróżnienie przedstawionej mi do oceny Rozprawy.**

Jacek Marczewski

