

Warszawa, 27 marca 2021r.

Prof. dr hab. inż. Jacek Marczewski
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki
Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa
jmarcz@ite.waw.pl

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

pt. **Multipleksacja promieniowania THz z wykorzystaniem nie-poosiowych optycznych struktur dyfrakcyjnych.**

autor: mgr inż. Paweł Komorowski

praca wykonana na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej

Promotor: dr hab. inż. Ryszard Piramidowicz, prof. PW,
promotor pomocniczy: dr inż. Agnieszka Siemion

Recenzowana rozprawa dotyczy metod projektowania optycznych struktur dyfrakcyjnych, umożliwiających zwielokrotnienie pojemności informacyjnej kanałów transmisji danych na częstotliwościach terahercowych. W pracy zaproponowano elementy dyfrakcyjne, umożliwiające multipleksację oraz demultipleksację modulowanych sygnałów optycznych. Zaproponowano algorytmy służące do projektowania struktur dyfrakcyjnych przekierowujących promieniowanie pozaosiowo; struktur skupiających promieniowanie o różnych częstotliwościach w różnych miejscach płaszczyzny ogniskowej oraz elementów skupiających promieniowanie w trzy plamki ogniskowe równoodległe od struktury. Praca zawiera nie tylko projektowanie i modelowanie różnorodnych struktur dyfrakcyjnych, ale obejmuje także ich wytwarzanie oraz weryfikację eksperymentalną uzyskanych wyników. W Rozprawie zastosowano nowatorskie metody optymalizacji elementów oraz algorytm optymalizowania rozkładu fazy przy użyciu splotowych sieci neuronowych.

Przedstawiona do recenzji praca liczy ponad sto stron, nie licząc stron zawierających streszczenia oraz spis treści i wyczerpującej bibliografii. Napisana została w języku polskim, bardzo starannie i przejrzyście, a jej układ nie budzi zastrzeżeń.

Zakres Rozprawy obejmuje wiele różnych zagadnień wymagających:

- biegłej znajomości szczegółowych zagadnień z zakresu optyki dyfrakcyjnej;
- umiejętności wykorzystania zawansowanych metod numerycznych włączając w ich liczbę technologię samouczących się sieci neuronowych;
- opanowania technologii wytwarzania struktur dyfrakcyjnych metodą druku 3-D;
- umiejętności prowadzenia eksperymentów optycznych.

Należy wspomnieć, że w odróżnieniu od elementów dyfrakcyjnych przeznaczonych dla fal zbliżonych do zakresu światła widzialnego, struktury dyfrakcyjne przeznaczone do manipulacji promieniowaniem THz mają znacznie krótszą historię i są znacznie trudniejsze do projektowania ze względu na konieczność prowadzenia analiz prawie wyłącznie w polu bliskim. W tym kontekście wiele

elementów Rozprawy ma element nowości a splotowa sieć neuronowa realizująca dyfrakcję światła jest zdaniem Recenzenta najciekawszą częścią pracy.

Pierwszy rozdział Rozprawy to wstęp, w drugim Autor przedstawił cel oraz tezy Rozprawy. Oba rozdziały są napisane jasno i zwięźle. **Celem pracy jest: „zaprojektowanie optycznych struktur dyfrakcyjnych, umożliwiających zwielokrotnienie pojemności informacyjnej terahercowych kanałów transmisji danych” zaś główną tezą stwierdzenie, że: „możliwe jest wykonanie układu multipleksującego sygnał terahercowy w oparciu o wykorzystanie zoptymalizowanych dyfrakcyjnych elementów optycznych działających nie-poosiowo”.** Teza ta rozbita jest następnie na trzy szczegółowe stwierdzenia dotyczące: konieczności zapewnienia wystarczającej separacji kanałów multipleksowanych; stworzenia iteracyjnego algorytmu optymalizacji struktur do ogniskowania pozaosiowego oraz implementacji sieci neuronowej do rozwiązywania problemów niemożliwych do zrealizowania klasycznymi metodami.

Trzeci rozdział Rozprawy stanowi wprowadzenie dotyczące stanu wiedzy i perspektyw aplikacyjnych promieniowania THz (ze szczególnym uwzględnieniem przesyłania danych). Następnie Autor opisuje krótko technikę multipleksowania kanałów THz i wprowadza podstawowe informacje z zakresu optyki dyfrakcyjnej i propagacji światła. Rozdział jest napisany jasno i zwięźle, choć z dwoma stwierdzeniami Autora trudno się zgodzić. Dotyczy to zwłaszcza stwierdzenia o niewielkiej wrażliwości transmisji w pasmach THz na warunki atmosferyczne (str. 20) – jest to stwierdzenie zdaniem recenzenta mylące (choć autor miał na myśli porównanie jedynie z liniami optycznymi). Drugie, to stwierdzenie dotyczące szczytowych osiągnięć transmisji THz w warunkach laboratoryjnych (ostatnie zdanie rozdziału 3.3 wspomina o pojedynczych Gb/s). Tymczasem artykuł Li X. et al. „1-Tb/s Millimeter-Wave Signal Wireless Delivery at D-Band” z roku 2019 (J. Lightwave Technol. Vol. 37, str. 196) donosi o transmisji 1Tb/s przy wykorzystaniu fali nośnej z pasma D i techniki 4x4 MIMO, choć stopa błędów transmisji jest zdaniem Recenzenta wysoce niezadawalająca.

Czwarty rozdział pracy poświęcony jest modelowaniu i optymalizacji struktur dyfrakcyjnych dla zakresu THz. To bardzo ważna część Rozprawy. Opisywane w niej metody dotyczą kolejno: opisu propagacji wstecznej a więc algorytmu umożliwiającego w konsekwencji użycie do optymalizacji splotowej metody dokonującej kolejnych iteracji propagacji fali świetlnej w obu kierunkach celem projektowania struktur dyfrakcyjnych. W części 4.3 omówiono algorytm optymalizacji bazujący na uczeniu się sieci neuronowej. Jest to zdaniem Recenzenta najciekawsza część Rozprawy. Niestety nie została ona wystarczająco szczegółowo opisana. Wyraźnym brakiem jest niepełny opis kluczowego dla czytającego Rys. 7, w którego podpisie nie podano znaczenia symboli (skrótów) oznaczających warstwy składowe sieci (P, CT, CP, R, F, MS itd.). Powinny być one opisane bądź w podpisie, bądź w tekście, gdzie niektóre są wspomniane ale bez podania symboli. Oczywiście uważny czytelnik może zerknąć do komentarza Autora (do którego odnośnik zamieścił on kilka stron dalej!) [\[WSS20\] Machine learning enhanced design of diffractive optical elements - Online Technical Discussion Groups—Wolfram Community](#) i znaleźć tam większość koniecznych informacji. Dlaczego jednak nie zostały one w całości umieszczone w kluczowym fragmencie Rozprawy pozostanie tajemnicą jej Autora. Zapewne sądził on, że skoro ogólny opis metody napisany na następnych stronach jest wyjątkowo przejrzysty, to jej konkretna implementacja w pakiecie obliczeniowym jest już drugorzędna. Następna część rozdziału dotyczy technologii wytwarzania struktur.

Rozdział piąty, dotyczy konkretnego projektu struktur i weryfikacji eksperymentalnej. Kilka szczegółowych uwag:

- czy na Rys. 11 nie warto byłoby umieścić dla celów porównawczych plamki ogniskowej dla soczewki przed wycięciem;

- dlaczego plamka na rys. 12a wydaje się być wyraźnie mniejsza od plamki Airy'ego, choć Autor pisze na poprzedniej stronie „Pierwszym krokiem jest opisanie docelowego rozkładu pola w płaszczyźnie ogniskowej – idealnego ogniska. Zostało one zdefiniowane jako plamka ograniczona limitem dyfrakcyjnym, wyrażonym jako średnica plamki Airy'ego...”;
- na str.52 stwierdzono, że „...większość detektorów (zarówno promieniowania THz, jak i światła widzialnego) rejestruje jedynie jego natężenie lub wielkości proporcjonalne do natężenia promieniowania”; dla detektorów THz to niekoniecznie prawda, niektóre rejestrują gęstość mocy (czyli językiem optyki natężenie światła) inne zaś mierzą pole elektryczne;
- na str. 58 w tekście opisującym wyniki „mocowe” (3%) dla kinofornu czwartego rzędu, stwierdzono, że mała wartość mocy związana jest z absorpcją PA 12 ($2,2 \text{ cm}^{-1}$), rolę absorpcji potwierdzono wykonując element z parafiny (stwierdzenie jednak, że za 3% odpowiedzialna jest jako dominująca absorpcja w PA 12 wydaje się w kontekście współczynnika $2,2 \text{ cm}^{-1}$ nieuzasadnione);

A pro pos weryfikacji eksperymentalnej, jak zauważa sam Autor, szczególnie cenny byłby eksperyment z podziałem zmodulowanej sygnałem cyfrowym wiązki na kanały, transmisją wiązek (w warunkach laboratoryjnych i ich ponowną demultipleksacją). Oczywiście sprawdzając stopy błędu transmisji przed i po. Nie jest to pomiar do wykonania ad hoc, ale nie przedstawia trudności eksperymentalnych dla niezbyt wielkich prędkości modulacji i prostego jej protokołu. Tym niemniej już prostsze eksperymenty wykonane przez Autora (i udokumentowane w ramach Rozprawy) wskazują, że zaprojektowane i wykonane w ramach pracy struktury dyfrakcyjne umożliwiają multipleksację promieniowania THz z podziałem częstotliwości. Realizacja multipleksowania w dziedzinie czasu jest zagadnieniem znacznie trudniejszym w warstwie eksperymentalnej. Tym niemniej Autor przeprowadził pomiary wskazujące, że zaprojektowane i wykonane w ramach pracy struktury umożliwiają skupianie promieniowania w trzy plamki ogniskowe, z których dwie znajdują się poza osią optyczną. W szczególności można uzyskać asymetrię rozkładu punktów. Struktury takie mogą być z powodzeniem użyte do realizowania kanałów z podziałem czasowym. Elementy przeznaczone do multipleksu czasowego przesymulowano także przy użyciu sieci neuronowej. W tym przypadku konieczne było zmniejszenie ilości punktów (rozmiar matrycy), co zapewne wynikało z ograniczeń środowiska obliczeń. Niestety na Rys. 38 brak na osi błędu jakichkolwiek wartości. Przedstawione na rys.39 mapy fazowe uzyskane przy użyciu sieci neuronowej są więcej niż interesujące. Wskazują bowiem, że podobnie jak w doświadczeniach z zupełnie innych dziedzin (np. rozwiązywaniu równań różniczkowych) algebra posługująca się splotami może pokazywać rozwiązania, które intuicyjnie są nieprzewidywalne. Spora część Rozprawy została poświęcona zaletom stosowania do projektowania struktur sieci neuronowej. W pracy znajdujemy nowatorskie wyniki dotyczące terahercowej struktury dyfrakcyjnej zaprojektowanej z wykorzystaniem sieci neuronowej i wykorzystującej jej uczenie.

Rozdziałem szóstym jest analiza tzw. niepewności. Zazwyczaj symulacje porównujemy z eksperymentami, to bardzo oczywista metoda walidacji. W przypadku eksperymentów THz droga optyczna jest w wielu miejscach współmierna z długością fali i wynik eksperymentu, zwłaszcza przy stosowaniu źródeł wysoce koherentnych prowadzi do szeregu artefaktów. Występują dodatkowe interferencje będące funkcją położenia elementów układu i częstotliwości fali a nawet związane z wewnętrzną budową źródeł i detektorów. Istnieją metody prowadzenia pomiarów w taki sposób aby maksymalnie uwolnić się od pasożytniczych interferencji, z którymi częściowo „zmierzył się” Autor (choć zdaniem Recenzenta walka z interferencjami to temat na odrębną pracę doktorską). Nawet drobne zmiany w orientacji detektora (czego dowodzi Rys. 48) mają istotny wpływ na zmierzony

przekrój natężeń plamek ogniskowych w eksperymentach w pracy (nawiasem mówiąc nie jest jasne dla czytelnika, czy detektor na tranzystorze polowym był zintegrowany z jakąkolwiek anteną?). Drugą grupą sygnalizowanych niepewności jest proces wykonywania struktur dyfrakcyjnych. Dyskretyzacja wymiarów realizowanych przez drukarkę 3-D niesie także ograniczenia. Autor oszacował (w najgorszym przypadku) chropowatość rzędu 0,1 mm, co dla częstotliwości sub-THz zostało ocenione jako akceptowalna wartość. Błędy związane z symulacjami numerycznymi Autor uznał za nieistotne.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie i wnioski. W Rozprawie przedstawiono iteracyjne metody projektowania i optymalizacji struktur dyfrakcyjnych dla pasm THz. Osiągnięto założony cel pracy i udowodniono postawione tezy. Przedstawiono trzy rodzaje struktur i wykazano, że projektowanie struktur skupiających promieniowanie poza osią optyczną wymaga zastosowania algorytmów iteracyjnych i takie algorytmy zaproponowano w pracy. Zaprojektowano także struktury skupiające promieniowanie o różnych częstotliwościach w innym położeniu, co może służyć do rozdzielania kanałów transmisji. Część przedsięwzięć służyła do stworzenia struktur przeznaczonych do multipleksacji z podziałem czasu, co jednak zdaniem Recenzenta jest zadaniem aplikacyjnie trudnym. Największym jednak osiągnięciem pracy jest zapewne algorytm optymalizacji wykorzystujący samouczącą się sieć neuronową, dalszym krokiem rozwoju tej techniki powinno być prawdopodobnie zastosowanie większej ilości wzorców uczących.

Wyniki prac pokazanych w Rozprawie zostały częściowo opublikowane w szeroko cytowanych czasopismach. Przedstawione w niniejszej Recenzji nieliczne uwagi krytyczne, w głównej mierze mają charakter marginalny i w niewielkim stopniu obniżają bardzo wysoką ogólną ocenę przedstawionej pracy. Stwierdzam, że Rozprawa „Multipleksacja promieniowania THz z wykorzystaniem niepoosiowych optycznych struktur dyfrakcyjnych” spełnia z nadmiarem 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 wysoki poziom recenzowanej Rozprawy oraz dorobek naukowy jej Autora, wnioskuję o wyróżnienie przedstawionej mi do oceny Rozprawy Doktorskiej (o ile jest to możliwe ze względu na wymagania wewnętrzne).

J. Małach
27/3/2021