

Warszawa, 23.12. 2024 r.

Prof. dr hab. inż. Janusz PARKA
Instytut Fizyki Technicznej
Wydział Nowych Technologii i Chemii
Wojskowa Akademia Techniczna
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2
e-mail: janusz.parka@wat.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Kałuży

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

1. Wprowadzenie i przedmiot recenzji

Recenzja niniejszej rozprawy doktorskiej została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej. Promotorem pracy doktorskiej mgr. inż. Mateusz Kałuży jest dr. hab. inż. Agnieszka Siemion, prof. uczelni. Praca dotyczy badania właściwości elementów optycznych dla promieniowania z zakresu 0.1 – 1.0 THz.

Zagadnienia dotyczące właściwości promieniowania terahercowego i jego zastosowań jest dość szeroko opisywana w licznych publikacjach naukowych. Tematyka jest także szeroko prezentowana na różnych międzynarodowych konferencjach o tematyce oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią. Podjęcie przez Doktoranta tematyki uważam za interesujące, choćby ze względu na coraz większe zainteresowanie wykorzystania tego zakresu promieniowania w telekomunikacji. Prac opisujących zagadnienia konstrukcji i właściwości elementów optycznych dla promieniowania terahercowego jest w literaturze światowej relatywnie niewiele.

W ostatnich latach obserwuje się rosnące zainteresowanie zastosowaniem technologii terahercowych (THz) w telekomunikacji. Ze względu na właściwości promieniowania terahercowego zastosowanie w otwartej przestrzeni ma swoje wady ze względu głównie na obecność pary wodnej, jednak w specjalnych warunkach np. przestrzeni kosmicznej wykorzystanie właściwości promieniowania z zakresu kilku do nawet kilkunastu THz wydaje się być niezwykle interesujące. Wykorzystanie pasma THz stwarza możliwość znaczącego

zwiększenia przepustowości transferu danych, co może prowadzić do poprawy wydajności systemów telekomunikacyjnych. Technologia THz ma potencjał do rozwiązania wielu wyzwań telekomunikacyjnych, jednak aby osiągnąć zwiększone przepustowości w stosunku do obecnie stosowanych transferów danych, konieczne jest zastosowanie układów multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz.

2. Zakres pracy i ocena merytoryczna

W niniejszej pracy przedstawiono różnorodne podejścia do projektowania dyfrakcyjnych elementów optycznych, które umożliwiają przestrzenną multipleksację i demultipleksację sygnałów THz. Opisano układ MIMO (ang. Multiple-Input Multiple-Output), w którym promieniowanie wygenerowane przez dwa przestrzennie rozdzielone źródła THz połączono w pojedynczy zbiorczy kanał optyczny przy użyciu struktury multipleksującej. Następnie, po propagacji wiązki sygnałów w wolnej przestrzeni, sygnały rozdzielono przestrzennie i skupiano na detektorze za pomocą struktury demultipleksującej. Szczególnym osiągnięciem jest w tym przypadku separacja sygnałów, których częstotliwości różnią się zaledwie o 0,9 GHz.

Badania, które podjął Doktorant, mają walor poznawczy, zwłaszcza te, które dotyczą nowych materiałów na elementy optyki terahercowej. Jest to kontynuacja pracy badawczej zainicjowanych wiele lat temu w zespole prof. Agnieszki Siemion. Według wiedzy recenzenta niewiele zespołów badawczych na świecie zajmuje się tą tematyką.

W pracy szczegółowo opisano metodę projektowania dyfrakcyjnych elementów optycznych. Przedstawiono nowatorską metodę modelowania przestrzennego. Przeprowadzono pomiary właściwości optycznych 103 materiałów przy użyciu technologii THz spektroskopii w dziedzinie czasu, a także przedstawiono wyniki badań nad wpływem parametrów druku przestrzennego w technologii FDM (ang. Fused Deposition Modeling) na właściwości optyczne THz dyfrakcyjnych elementów optycznych.

Przeprowadzone zostały symulacje numeryczne oraz pomiary eksperymentalne z użyciem struktur (de)multipleksujących, które wykazały wysoki stopień zgodności założonego projektu z prawidłowym działaniem zaprojektowanych struktur.

Pozytywne rezultaty badań dają szansę na budowę nowej klasy urządzeń fotonicznych jak np. przestrzajalnych multiplekserów optycznych, itp.

Układ rozprawy jest klasyczny. Rozprawa liczy 175 stron, przy czym 126 stron stanowi główną część rozprawy, a dalsza część zawiera literaturę oraz 7 załączników precyzujących

uzyskane rezultaty. Taki podział rozprawy na część zasadniczą i załączniki uważam za bardzo dobry zabieg edycyjny, ponieważ ułatwia zapoznanie się z istotnymi rezultatami pracy.

Rozprawa została podzielona na osiem rozdziałów. Rozdział pierwszy i drugi zawierają wstęp, główną motywację oraz tezę rozprawy. W części literaturowej (rozdz. 1) przedstawione zostały zagadnienia związane z zakresem badań podejmowanym w rozprawie. Autor podaje w nim podstawowe informacje dotyczące realizowanego zagadnienia badawczego oraz motywację, która skłoniła go do zajęcia się tematyką multipleksacji i demultipleksacji promieniowania z zakresu THz. Literatura dotycząca tematu pracy, zdaniem recenzenta, dobrana jest poprawnie, a cytowania prac właściwe. Przedstawiona analiza zagadnień podejmowanych w pracy w oparciu o dane literaturowe świadczy o dobrym rozpoznaniu tematyki badań i przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia pracy naukowej. Zabrakło jednak, zdaniem recenzenta, przytoczenia w oparciu o dane literaturowe konkretnych parametrów dotyczących elementów dyfrakcyjnych proponowanych przez innych badaczy, co pozwoliłoby na zorientowanie się na ile materiały badane są lepsze lub gorsze w stosunku do innych proponowanych lub podobnych rozwiązań. W rozdziale drugim zawarta jest teza pracy mówiąca, że „Możliwe jest opracowanie wielokanałowego systemu transmisji sygnałów w oparciu o dyfrakcyjne elementy optyczne realizujące funkcjonalności multipleksacji i demultipleksacji promieniowania THz”. Teza została określona precyzyjnie.

W rozdziale trzecim Doktorant opisał główne zagadnienia dotyczące tematyki pracy, natomiast w rozdziale czwartym skupił się na opisie metod, których używał w przeprowadzonych badaniach, zarówno materiałowych, jak i dotyczących projektowania struktur dyfrakcyjnych. W rozdziale piątym opisane zostały wyniki badań przeprowadzonych dla różnych materiałów polimerowych, kompozytów i materiałów odlewniczych. Rozdział szósty przedstawia metody projektowania, prototypowania oraz wyniki uzyskane dla DOE realizujących funkcjonalność multipleksacji oraz demultipleksacji promieniowania THz, jak i wyniki uzyskane dla zaproponowanego układu MIMO. Rozdział siódmy poświęcony jest analizie błędów oraz problemów, które Doktorant napotkał podczas wykonywania pomiarów. Jest to bardzo istotne dla prawidłowej interpretacji i oceny rezultatów uzyskanych w pracy.

Rozdział ósmy podsumowuje wyniki pracy i przedstawia najważniejsze osiągnięcia, a także nakreśla perspektywę dalszych badań w zakresie optyki terahercowej. Jest to o tyle istotne, że Doktorant zdaje sobie sprawę, że aby zaprezentowane w rezultaty mogły być wykorzystane praktycznie niezbędne są dalsze badania i testy zaprojektowanych elementów optycznych w konkretnych dedykowanych układach. Badania właściwości optycznych 103 różnych materiałów wykonano przy użyciu technologii THz TDS (Time Domain

Spectroscopy). Badania te dotyczyły sześćdziesięciu próbek wykonanych przy użyciu technik wytwarzania przyrostowego, to jest takich jak FDM (Fuse Deposition Modeling) i SLS (Selective Laser Sintering), z materiałów polimerowych i kompozytowych, a także 43 próbek wytworzonych metodą odlewniczą z różnych rodzajów glin, wosków, czekolad i mydeł. Te ostatnie uważam, za mało praktyczne patrząc z aplikacyjnego punktu widzenia. Analiza wyników wykazała znaczące różnice we współczynnikach absorpcji, a także opóźnień fazowych jakie wprowadzają poszczególne materiały polimerowe i kompozyty używane w druku 3D w technologii FDM.

Z rezultatów badań wykonanych w pracy okazało się, że niektóre materiały mają małe wartości współczynnika absorpcji (poniżej $2,34 \text{ cm}^{-1}$ dla częstotliwości 1 THz) co czyni je pożądanymi materiałami do produkcji pasywnych elementów optycznych, takich jak dyfrakcyjne elementy optyczne. Z kolei różnice we współczynniku załamania w zakresie od 1,34 do 1,57 wyznaczone dla częstotliwości 0,3 THz pozwalają na wybór konkretnego materiału odpowiedniego dla pożądanego zakresu promieniowania THz.

Należy podkreślić, że w systemach telekomunikacyjnych występuje konieczność wykorzystania multipleksacji sygnałów w celu zwiększenia np. przepustowości łącz telekomunikacyjnych. Te zaś zależą od jakości zastosowanych elementów optycznych. Maksymalizacja wydajności dyfrakcji elementów optycznych w badanym zakresie THz była kolejnym ważnym zagadnieniem badanym w pracy.

Metody projektowania elementów DOE przedstawione w pracy do zastosowań telekomunikacyjnych wydają się gwarantować zwiększenie wydajności dyfrakcyjnej względem innych rozwiązań proponowanych w literaturze rozwiązań. W kolejnym etapie pracy Doktorant położył szczególny nacisk na proces wytwarzania DOE, co recenzent uważa za bardzo istotne. Powstaje pytanie czy ten sposób wytwarzania elementów optycznych dla techniki THz może być relatywnie konkurencyjny i na ile konkurencyjny w stosunku do innych metod np. odlewania czy też plastycznego formowania, o których Autor wspomina w niniejszej pracy? Mgr. inż. Mateusz Kałuża przeprowadził analizę wpływu parametrów druku przestrzennego w technologii FDM na właściwości optyczne materiału COC (ang. Cyclic Olefin Copolymer) w zakresie promieniowania THz, co ma niezwykle praktyczne znaczenie dla wykonania elementów dyfrakcyjnych.

Jakość uzyskanych wyników, poprawność opisu metod badawczych, interpretacji wyników i wyciąganych na ich podstawie wniosków jest właściwa. Uzyskane w pracy wyniki są interesujące.

3. Uwagi merytorycznie i ogólne

Jako recenzent przedstawiam uwagi krytyczne, wskazujące choćby na to, że istotnie zapoznał się z przedstawianą pracą, dlatego też poniżej przedstawiam spostrzeżenia, które nasunęły mi się podczas lektury niniejszej rozprawy. Chciałbym by Autor rozprawy do uwag merytorycznych ustosunkował się w części obrony poświęconej odpowiedziom recenzentów.

Praca napisana jest zrozumiałym językiem technicznym, a redakcja składna i przejrzysta. Jednak w tekście rozprawy recenzent znalazł kilka nieprecyzyjnych sformułowań, np. na str. 118, sformułowanie „...pomiaru THz TDS..” na str. 121, sformułowanie „...do konkretnych zastosowań aplikacyjnych...” i kilka innych. Doktorant używa konsekwentnie określeń Rozdział np. 1. z kropką. Taką samą notację stosuje doktorant oznaczając rzędy dyfrakcji. Spotykam się z takim zapisem po raz pierwszy, mimo, że recenzowałem już wiele różnych prac, to z takimi zapisami się nie spotkałem. Podobnie powołanie się na rysunek w tekście również jest pisane z dużej litery, co nie ma chyba uzasadnienia w polskiej pisowni, natomiast w języku angielskim tak. Podobnych uchybień językowych znalazłem jeszcze kilka, ale uważam je za mało ważne więc ich nie przytaczam. W pracy zdecydowano się na zastosowanie skróconych nazw przyjętych z języka angielskiego ze względu na dominującą dostępność literatury naukowej w tym języku oraz konieczność zachowania spójności z nazewnictwem stosowanym w cytowanych źródłach. Skrótów tych jest naprawdę bardzo dużo i trudno z tym polemizować np. str. 53 – 5 skrótów (FDM, TDS, DOE, SLS, COC), str. 55 - 5 skrótów (FDM, PETG, SLS, PLA, PP), strona 105 – 5 skrótów (DOE, MIMO, MISO3, SIMO5, DWL), itd. Posługiwanie się pełnymi nazwami zwiększałoby objętość tekstu. W związku z powyższym, zdaniem recenzenta, w pracy na początku powinien znaleźć się skorowidz tych skrótów, co ułatwiłoby czytanie i zrozumienie tekstu oraz brak potrzeby szukania opisu konkretnego skrótu w tekście rozprawy. Trzeba jednak przyznać, że każdy z tych skrótów jest w tekście opisany. Dobrze byłoby też przetłumaczyć określenia skrótów przetłumaczyć na język polski.

Na str. 75 doktoratu mgr inż. Mateusza Kałuży znalazło się stwierdzenie „dodatkowo przeprowadzono analizę numeryczną uzyskanych wyników symulacji”. W dalszej części paragrafu recenzent nie znalazł jednak wyjaśnienia na czym polegała ta przeprowadzona numeryczna analiza symulacji. Również na tej samej stronie w tabeli 6.1 przedstawione zostały względne wartości wydajności dyfrakcyjnej trzech struktur, gdzie największa wartość wynosi 51,4 %. Zgodnie z definicją podaną jako formuła 6.1 jest to, według recenzenta, bez potrzeby używania przymiotnika względna, po prostu wydajność. Ponieważ mamy tutaj raczej z siatkami

cienkimi należałoby zadać pytanie jaka jest maksymalna wartość wydajności dyfrakcyjnej i jeśli by przyjąć, że 100%, to powstaje pytanie w jakim przypadku wydajność dyfrakcyjna osiągnęłaby wartość maksymalną.

Na rys. 5.2 na str. 56 (dotyczy to również rys. A3 na str. 139 – załącznik 3) pokazane są wartości absorpcji oraz współczynniki załamania badanych próbek polimerowych. O ile wraz wzrostem częstotliwości współczynniki absorpcji rosną to współczynniki załamania są prawie niezależne od częstotliwości (linie przerywane prawie płaskie). Ponieważ za absorpcję odpowiada część urojona współczynnika załamania, to jest pytanie dlaczego nie ma to w tym przypadku wpływu na współczynnik załamania. Zakładając poprawność uzyskanych wyników pomiarów poproszę o ustosunkowanie się Doktoranta do tych zależności i przynajmniej próbę wyjaśnienia otrzymanych danych.

Na str. 114 recenzent odnotował, że „...zastąpienie komponentu siatki binarnej struktury SIMO5 przez siatkę o strukturze piłokształtnej pozwoliłoby na zwiększenie wydajności dyfrakcyjnej w pojedynczym rzędzie ugięcia...”. Takie stwierdzenie jest dla recenzenta niejasne. Pojawia się pytanie dlaczego tylko w pierwszym rzędzie oraz o ile wzrosłaby w takim przypadku wydajność dyfrakcji. Oddzielne pytanie jest również takie dlaczego wobec możliwej większej wydajności dyfrakcji nie stosowano tego rozwiązania w prezentowanej rozprawie doktorskiej.

4. Podsumowanie

Na dorobek publikacyjny Doktoranta związany z tematem pracy doktorskiej składają się 4 współautorskie prace, z których 3 znajdują się w czasopismach z listy JCR. W trzech pracach Doktorant jest pierwszym autorem. 6 prac zostało opublikowanych w wydawnictwach spoza listy JCR, sklasyfikowanych jako artykuły pokonferencyjne związane z tematyką pracy doktorskiej. Dodatkowo Doktorant jest współautorem 4 publikacji, które są związane tylko pośrednio z rozprawą doktorską. Dotyczy to również 6 prac pośrednio wiążących się z tematyką, a opublikowanych jako artykuły pokonferencyjne. Świadczy to o dużej aktywności naukowej doktoranta. Recenzent nie znalazł w pracy informacji czy Doktorant brał udział w projektach badawczych. Za największe osiągnięcie niniejszej rozprawy uważam zaproponowaną przez Doktoranta nowatorską metodę modelowania przestrzennego elementów optycznych dla zakresu THz. Uzyskane wyniki separacji sygnałów poniżej 1 GHz również należy uznać za bardzo ważne. Bardzo istotne jest również to, że Doktorant zrealizował postawione cele kompleksowo, tj. od symulacji poprzez ich eksperymentalną weryfikację.

Dorobek naukowy mgr inż. Mateusza Kałuży jest więcej niż wystarczający zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym. Dla porządku dodać należy, że zgodnie z wymaganiami ustawowymi przy realizacji pracy doktorskiej dorobek publikacyjny nie jest wymagany.

Zdaniem recenzenta w podsumowaniu brak jest szerszego odniesienia się Doktoranta odnośnie uzyskanych przez niego rezultatów do wyników podobnych badań opisanych w literaturze, czyli tego co zrobili inni i jak rezultaty Doktoranta można odnieść do badań prezentowanych w literaturze. Warto byłoby również wskazać jakie parametry materiałów byłyby idealne dla elementów optyki terahercowej i jakich w przyszłości należy poszukiwać.

Przedstawione powyżej uwagi nie umniejszają mojej końcowej, pozytywnej oceny rozprawy. Podsumowując uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Kałuży zawiera duży ładunek udokumentowanych nowości naukowych z zakresu badań o znaczeniu poznawczym oraz niewykluczone, że może w przyszłości również aplikacyjnym. Należy raz jeszcze podkreślić, że Doktorant podjął się badania bardzo interesujących zjawisk, które mogą być istotne dla fotoniki terahercowej. Zawarte w podsumowaniu, a zaproponowane przez Doktoranta kierunki dalszych badań zachęcają do kontynuacji prac w tym kierunku.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Kałuży spełnia warunki przewidziane ustawą o tytułach i stopniach naukowych. Wnoszę o przyjęcie pracy i dopuszczenie jej autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Janusz Parka

