

prof. dr hab. Jan Masajada
Katedra Optyki i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław 29.01.2026

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgr inż. Mateusza Surmy

Miniaturyzacja terahercowych odbiciowych układów skanujących z wykorzystaniem optycznych struktur dyfrakcyjnych

Przedstawiona rozprawa doktorska poświęcona jest badaniom terahercowego układu skanującego, pracującego w świetle odbitym. Wartością dodaną jest uproszczona konstrukcja skanera oraz jego mniejsze rozmiary w stosunku do obecnie stosowanych rozwiązań. Ma to zostać osiągnięte przez zastosowanie specjalizowanych dyfrakcyjnych elementów optycznych.

Wyniki zaprezentowane w rozprawie zostały opublikowane w trzech publikacjach w czasopismach naukowych. Są to Scientific Reports, Photonics Letters of Poland i Optics Express. Z pracą związany jest jeden artykuł pokonferencyjny. Praca wykonana została w ramach projektu LIDER (11/0036/L-9/17/NCBR/2018), jako jego część. Doktorant pełnił w projekcie funkcję wykonawcy.

Oprócz powyższego doktorant jest współautorem w ośmiu artykułach w czasopismach naukowych oraz dziewięciu komunikatów konferencyjnych, które zostały określone jako związane z pracą, ale leżące poza jej zakresem. Brał nadto udział w dwóch innych projektach jako wykonawca i dwóch projektach

wewnętrznych Politechniki Warszawskiej jako kierownik. Poniżej przechodzę do szczegółowego omówienia pracy.

Rozdział pierwszy określa motywację i cel pracy. Wśród wymienionych zastosowań promieniowania teraherztowego autor wymienia diagnostykę nowotworową, która jest jednym z celów dla budowanego skanera.

Rozdział drugi definiuje cel, zakres i tezę rozprawy.

Rozdział trzeci zawiera wprowadzenie teoretyczne. Doktorant omawia pokrótce te elementy i pojęcia, które są znaczące dla dalszej części rozprawy. W kolejności są to elementy dyfrakcyjne wraz z iteracyjnymi metodami ich projektowania oraz materiałami użytymi do ich wytworzenia w technice druku 3D. Następnie doktorant omawia układ terahertzowej spektroskopii w dziedzinie czasu, która jest punktem odniesienia dla opracowywanego układu. W ostatniej części omówione jest zastosowanie promieniowania teraherztowego do diagnostyki nowotworowej.

W rozdziale czwartym przedstawiona jest metoda projektowania struktur dyfrakcyjnych i ich wykonanie w druku 3D i wynik testów. Rozpatrzone zostały dwa przypadki: struktur dla układu z oświetleniem punktowym i z oświetleniem w pełnym polu. Rozwijany układ wymaga trzech elementów optyki terahertzowej. Poosiowej soczewki skupiającej, pozaosiowej soczewki skupiającej i pozaosiowej soczewki obrazującej. Schemat pokazany na rysunku 4.1 obrazuje działanie układu skanującego. W pracy brak jest schematu układu obrazującego w całym polu.

Struktury dyfrakcyjne zostały zaprojektowane z użyciem algorytmu iteracyjnego będącego modyfikacją znanych algorytmów opracowanych w grupie badawczej doktoranta. Na potrzeby oświetlenia całego pola pomiarowego opracowany został projekt elementów segmentowych. Elementy te są podzielone na cztery segmenty, których sumaryczne działanie miało dać jednorodne oświetlenie pola pomiarowego. W szczególności taka konstrukcja miała w swym założeniu zmniejszyć efekt spekli. Przed wykonaniem zaprojektowanych struktur doktorant testował wybrane materiały z wykorzystaniem terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu (THz TDS), co pozwoliło wybrać te o optymalnych parametrach. Kryteriami doboru były: współczynnik załamania oraz współczynnik absorpcji.

Oszacowane straty wywołane przez absorpcję i odbicie na zaprojektowanych strukturach nie przekraczają 7% dla struktur punktowych i 11 % dla struktur segmentowych. Straty oszacowano na podstawie prawa Beera-Lamberta (absorpcja) i wzorów Fresnela (odbicie).

Do zaprezentowanych treści mam następujące uwagi

- Doktorant wykorzystał dwie metody kształtowania topografii elementów dyfrakcyjnych: metodę liniową oraz słupkową. O ile metoda słupkowa jest oczywista o tyle metoda liniowa sprawia osobie o ograniczonej wyobraźni graficznej (jak to jest w moim przypadku) pewien problem. Krótki opis tej metody nie wystarcza na pewne wyobrażenie sobie tak wydrukowanej struktury. Dobrze byłoby zamieścić ilustrację jej fragmentu czy to z projektu czy jako zdjęcie z już wykonanego elementu.

- Czy można określić dokładność druku słupków; jaki jest błąd wysokości?

- W tabeli 4.4. skrót HC identyfikuje strukturę sześciokątną co jest niezgodne z wcześniejszym opisem.

- Zdanie (strona 37):

Jednorodny rozkład wyjściowy również musi posiadać kształt kompatybilny z układem skanującym, a więc również dostosowany do problemu parkietażu w przypadku skanowania większych powierzchni niż oświetlone pole.

jest dla mnie niejasne. Dlaczego rozkład wyjściowy ma być dopasowany do problemu parkietażu? To raczej parkietaż musi być odpowiedni do żądanego rozkładu wyjściowego.

Rozdział 5 poświęcony jest analizie numerycznej zaprojektowanych struktur segmentowych. Analiza prowadzona jest w reżimie optyki skalarnej na programie LightSword. Na podstawie analizy uzyskanych wyników autor wyciąga wnioski, że struktury segmentowe dają bardziej jednorodne pole od struktur jednolitych. Jednak uzyskana poprawa nie kwalifikuje ich jako istotnie lepszych do zastosowań w planowanym skanerze.

Mam następujące uwagi i pytania dotyczące tego rozdziału

Skąd wiadomo, że wiązka uzyskana w układzie pokazanym na rysunku (5.1) ma gaussowski profil amplitudy?

Na dole strony 52 autor stwierdza, że nie można określić położenia płaszczyzny obrazowej, gdyż modelowanie numeryczne gubi informację o fizycznej grubości struktur. Wygląda na to, że nie rozumiem myśli autora. Fakt, że w modelowaniu używamy przybliżenia przedmiotu cienkiego zwykle nie stanowi przeszkody do znalezienia płaszczyzny obrazowej.

Rysunki struktur dyfrakcyjnych (5.4) uwidaczniają liczne prążki typu widelec, które generują wiry optyczne. Czy mając to na uwadze można było się spodziewać pola o wysokiej jednorodności?

Rozdział 6 obejmuje omówienie charakterystyki wydrukowanych struktur. Układ wymagał opracowania oprogramowania sterującego, które zostało udostępnione na platformie Github. Doktorant wizualnie ocenił jakość wydruk, a następnie w układzie pomiarowym mierzył odwzorowanie układu zaczynając od elementu skupiającego oznaczonego jako S0 i w kolejnych krokach dodając pozostałe elementy układu. Szukając punktu największego skupienia określił ogniskową soczewki S0 na wartość 10mm. Ponieważ była to zarazem najmniejsza odległość na jaką mógł podjechać detektor pozostaje otwarte pytanie czy w położeniu 9mm wyniki nie byłyby lepsze.

Po dołożeniu elementu oznaczonego jako SE doktorant uzyskał dwa równoważne położenia maksimów w odległości 78mm i 83mm. Na tej podstawie przyjął orientacyjne położenie ogniska układu S0 i Se na 80mm.

W ostatnim kroku do układu została dołożona struktura SD. Autor otrzymał w tym przypadku dwa położenia 100 i 120mm kandydujące do miana ogniska układu.

Z opisu wygląda na to, że ogniska były identyfikowane na bazie analizy wizualnej uzyskanych obrazów. Czy typowe metody stosowane w takich zagadnieniach typu obliczanie odchylenia standardowego w odniesieniu do środka ciężkości obrazu nie byłyby tu bardziej wiarygodne? Szczególnie dotyczy wydłużonych obrazów uzyskanych po dołożeniu struktury SE i SD.

Uzyskane plamki widocznie odbiegają od tych, do których przyzwyczajeni jesteśmy przy analizie obrazów uzyskanych z układów optycznych. Analizując powyższe wyniki autor wysuwa różne przypuszczenia co do źródła pogorszonej jakości obrazów. Głównie są to błędy justowania. Pojawia się pytanie czy można przeliczyć model numeryczny układu, tak aby pokazać jaka powinna być plamka w warunkach idealnego justowania. Narysowanie takich rozkładów dla kilku

położen płaszczyzny obrazu dałoby czytelnikowi lepsze pojęcie o jakości i kształcie plamki w badanym układzie. Na tej podstawie łatwiej byłoby szukać przyczyn zaburzeń w plamce rzeczywistej.

Rozdział 7 przedstawia konstrukcję i wyniki uzyskane w układzie, który doktorant nazywa demonstratorem. Demonstrator ma za zadanie wykazać, że wydrukowane elementy dyfrakcyjne pozwalają na złożenie działającego przyrządu do skanowania próbek z użyciem zogniskowanej wiązki terahertzowej. Zaletą układu ma być jego prosta konstrukcja i niewielkie rozmiary w porównaniu z innymi rozwiązaniami o podobnej funkcjonalności oraz jedno źródło promieniowania terahertzowego i jeden detektor. Zmontowany układ został przetestowany na czterech rodzajach próbek. Pierwszą z nich jest zwierciadło, które jest próbką referencyjną. Druga próbka to metalowa płyta fragmentem testu USAF. Trzecia to polimerowe pastylki a czwarta to polimerowy fantom skóry z pastylkami z tworzywa sztucznego mającego imitować skórę ze zmianami nowotworowymi.

Testy ze zwierciadłem pokazały, że w podstawowym zakresie przyrząd działa zgodnie z oczekiwaniami. Testy z próbką USAF są za słabe by dobrze określić rozdzielczość układu. Mogą posłużyć do przybliżonego jej określenia. Zastanawia mnie duży rozrzut natężenia wiązki, gdy poruszamy się wzdłuż krawędzi otworu 5mm, lub przechodzimy z jego lewej na prawą krawędź. Zdjęcie pastylki (próbka numer 3) wyszło najbardziej przekonująco. Analiza fantomu skóry z pastylkami imitującymi guzy wyszła średnio dobrze. Biorąc pod uwagę obecną rozdzielczość przyrządu (ok. 4mm) oraz jakość uzyskanych obrazów, odnoszę wrażenie, że do zastosowań medycznych tego układu jest jeszcze długa droga.

Na końcu strony 82 doktorant błędnie pisze, że rozdzielczość układu może być zwiększona przez zwiększenie długości fali na jakiej pracuje skaner.

Zgodnie z końcowymi wnioskami autora elementy pozaosiowe w badanym układzie pozwalają na zmniejszenie jego rozmiarów kosztem jednak obniżenia jakości obrazowania.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie wyników pracy.

Podsumowanie

W mojej ocenie przedstawiona rozprawa doktorska wnosi do tematyki wymagany ładunek nowości. Zawiera oryginalne wyniki uzyskane przez doktoranta, związane z procesem projektowania pozaosiowych soczewek dyfrakcyjnych na zakres terahertzowy, ich wykonania w technice druku 3D, oraz budowy i testowania układu skanującego. Praca napisana jest dobrym językiem z nielicznymi uchybieniami. Literatura jest dobrze dobrana. Wydaje się, że praca była pisana pod ciśnieniem czasu i w mojej opinii pewne zagadnienia mogły być opisane bardziej wyczerpująco. Brak mi przykładowo wyników symulacji numerycznych układu ogniskującego i porównania wyników numerycznych z eksperymentalnymi. Praca ma dobre osadzenie w publikacjach, choć biorąc pod uwagę liczbę publikacji doktoranta mam wrażenie, że wybór prac zaliczonych do rozprawy był oszczędny. Sprawia to wrażenie, że rozprawa powstała trochę na marginesie poważniejszych zainteresowań doktoranta.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska, w świetle obowiązującej ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych, spełnia wynikające z tejże ustawy kryteria i może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk fizycznych. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Jan Masajada
