

Warszawa, dnia 3 czerwca 2019 roku

Dr hab. inż. Tomasz Kozacki, prof. uczelni
Instytut Mikromechaniki i Fotoniki
Wydział Mechatroniki, Politechniki Warszawskiej
ul. A. Boboli 8,
02-525 Warszawa
tel. (+48) 222348518
e-mail: t.kozacki@mchtr.pw.edu.pl

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jarosława Bomby
p.t. „Struktury antyrefleksyjne dla promieniowania terahercowego wykonane
w technologii druku 3D”
wersji poprawionej i uzupełnionej**

1. Wstęp

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jarosława Bomby p.t. "Struktury antyrefleksyjne dla promieniowania terahercowego wykonane w technologii druku 3D" dotyczy zagadnienia interakcji promieniowania terahercowego z materiałem, gdzie mamy do czynienia z silnym efektem odbicia. Praca poświęcona jest opracowaniu struktury antyrefleksyjnej, która wykorzystywana będzie w urządzeniach pracujących z promieniowaniem terahercowym. W rozprawie zaproponowano wytworzenie struktur antyrefleksyjnych z wykorzystaniem druku 3D.

Opracowanie rozwiązania wymagało realizacji zadań numerycznych i eksperymentalnych. Na część numeryczną składa się opracowanie projektu, przeprowadzenie symulacji numerycznych bazujących na dokładnym modelu FDTD (ang. *Finite Difference Time Domain Method*). Natomiast, część eksperymentalna zawiera wykonanie struktury, budowę stanowiska pomiarowego, oraz przeprowadzenie badań.

Praca doktorska zrealizowana pod promotorstwem prof. nzw. dr hab. Michała Makowskiego stanowi rozwiązanie ambitnego, istotnego i bardzo praktycznego zadania określonego poprzez hipotezę pracy brzmiącą następująco: „możliwe jest wytworzenie struktur antyrefleksyjnych dla promieniowania terahercowego przy użyciu technologii druku 3D”.

2. Opis osiągnięć naukowych i technicznych

Rozprawa liczy 116 stron i gromadzi liczbę 70 pozycji bibliograficznych, w tym również współczesnych, pozwalających na zapoznanie się ze stanem badań dotyczących rozważanego zagadnienia. Praca składa się z trzech części: wstępnej, która zawiera stan wiedzy (rozdział 1), implementacyjno-numeryczno-eksperymentalnej (rozdziały 2, 3, 4, 5, 7), podsumowującej (rozdział 6) oraz dodatku zawierającego wyniki przeprowadzonych symulacji. Praca została podzielona na siedem rozdziałów.

Rozprawa zaczyna się od części zarysowującej obszar poruszanej tematyki, przedstawiona jest struktura pracy i jej teza. Uważam, że cel pracy jest aktualny, a jego realizacja może przynieść nowe, ważne rozwiązania naukowe i techniczne.

Pierwszy rozdział rozprawy zawiera syntetyczny opis zagadnień stanowiących bazę, oraz podstawę teoretyczną badanego zagadnienia. Kolejno opisane jest promieniowanie terahercowe, jego cechy użytkowe, metody detekcji, emisji oraz kształtowania. Rozdział opisuje szereg zastosowań struktur antyrefleksyjnych (AR) opracowanych dla promieniowania terahercowego. Mamy tu opis podstawowych rozwiązań struktur antyrefleksyjnych, przedstawiona jest podstawowa wiedza na temat siatek dyfrakcyjnych. Bardzo istotnym elementem tego rozdziału dla opracowywanego rozwiązania technologicznego jest baza teoretyczna projektowanej struktury antyrefleksyjnej, gdzie opisano analityczne podstawy realizacji numerycznego projektu struktury. Należy podkreślić, że opis jest przejrzysty i z łatwością pozwala na zapoznanie się z przedstawianymi problemami.

Część druga opisuje metrologiczny układ doświadczalny zbudowany specjalnie na potrzeby realizacji zadań rozprawy doktorskiej oraz metodologię przeprowadzanych pomiarów, które umożliwiają ewaluację opracowanej struktury. Opisany jest układ THz-TDS (ang. *Terahertz Time-Domain Spectroscopy*) wykorzystywany do pomiarów spektralnych promieniowania terahercowego pracującego w zakresie częstotliwości od 0,1 THz do 1 THz. Zbudowany system jest układem skanującym wykorzystującym ruch detektora oraz linii opóźniającej. W celu zrozumienia działania systemu przedstawiono opis zbudowanego programu sterującego pomiarem, oraz algorytmu pomiaru spektralno-kątowego rozkładu natężenia.

Rozdział trzeci jest bardzo ważną częścią pracy. Rozdział zawiera projekt numeryczny i technologiczny opracowanych struktur antyrefleksyjnych, oraz opis wytworzonych struktur, które były badane w kolejnej części pracy. Projekt numeryczny pokazuje kształt idealny oraz jego implementacje biorącą pod uwagę rozdzielczość druku. Zaprojektowano dwie struktury antyrefleksyjne: jednostronną, dwustronną. Przeprowadzone analizy wykonane są również dla struktury odniesienia, która ma postać płytki płasko równoległej o grubości równej grubości zaprojektowanych warstw.

Kolejnym ważnym elementem zawartym w rozdziale trzecim są przedstawione badania symulacyjne propagacji promieniowania terahercowego przez badane struktury. Badania zostały wykonane stosując oprogramowanie komercyjne „FDTD Solutions” firmy Lumerical. W rozdziale opisano podstawy teoretyczne metody numerycznej symulacji propagacji promieniowania elektromagnetycznego przy zastosowaniu metody różnic skończonych w dziedzinie czasu FDTD (ang. *Finite Difference Time Domain Method*). Bardzo dokładnie przedstawiono tu szereg symulacji. Wykonane symulacje dotyczą propagacji przestrzennych wiązek Gaussowskich o różnej długości fali - w przedziale od 0,1 THz do 0,3 THz przez struktury antyrefleksyjne jednostronne i dwustronne. Symulacje pozwalają opisać szereg interesujących efektów. W kolejnych symulacjach pokazano zależność wartości sygnału odbitego od kąta padania, zależność sygnału przechodzącego od kąta padania, od polaryzacji, zależność wartości sygnału przechodzącego oraz odbitego od grubości podkładu próbki, efekt oświetlenia wiązką znajdującą się wewnątrz struktury, współdziałanie struktury antyrefleksyjnej z przykładową soczewką, oraz odbicie od nieskończonej powierzchni płaskiej. Symulacje komentowane są w sposób wyczerpujący, można znaleźć szereg logicznych wniosków. Część wyników symulacyjnych w postaci tabelarycznej została zawarta w rozdziale siódmym uzupełniającym.

Rozdział czwarty opisuje technikę wytwarzania badanych struktur antyrefleksyjnych. Znajduje się tu opis technologii druku 3D. Rozdział zawiera opis wytworzenia badanych struktur za pomocą komercyjnej drukarki 3D wykorzystującej technikę SLS. Rozdział zawiera wszystkie konieczne techniczne parametry wytworzonych struktur.

Rozdział piąty jest kluczową częścią pracy, która pokazuje wyniki eksperymentalne uzyskane dla opracowanych i wytworzonych struktur antyrefleksyjnych. Rozdział został podzielony na trzy części, gdzie pierwsza część opisuje wyniki pomiarów światła przechodzącego i odbitego od struktury referencyjnej. Mamy tu wyniki pomiarów oraz graficzne porównanie wyników teoretycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych. Należy podkreślić, że uzyskanie zgodności między eksperymentem, symulacją a opisem teoretycznym jest zawsze bardzo trudne. Kolejne eksperymenty opisane w rozdziałach 5.2, oraz 5.3 przedstawiają pomiary uzyskane dla opracowanych struktur antyrefleksyjnych jednostronnych i dwustronnych. Rozdział 5.2 przedstawia i analizuje wyniki pomiarów promieniowania odbitego od badanych struktur, natomiast rozdział 5.3 promieniowania przechodzącego. Ta część również pokazuje wyniki, których elementy wskazują na analogię do przeprowadzonych symulacji. W obu rozdziałach zawarto porównawcze zestawienie wyników. Porównano tu wyniki otrzymane dla wszystkich trzech badanych struktur, w formie obrazów 2D pokazujących wartość natężenia fal odbitych i przechodzących. W formie wykresu porównano wartości średniej zmierzonego promieniowania odbitego i przechodzącego. Natomiast w formie tabeli pokazane są parametry całkowite zmierzonych rozkładów.

W **części podsumowującej** (piąty rozdział pracy) w sposób syntetyczny i czytelny przedstawiono uzyskane wyniki pracy. Sformułowano wnioski wpływające z przeprowadzonych badań i opracowanych rozwiązań.

Uwagi edycyjne

Praca pod kątem edycyjnym nie budzi zastrzeżeń.

Opis dokonań naukowych

Wyniki rozprawy zostały przedstawione w jednym artykule¹, który ukazał się w wysoko notowanym czasopiśmie z tzw. listy filadelfijskiej. Jest to praca wieloautorska. Pan Jarosław Bomba jest jej pierwszym autorem. W bazie Web of Knowledge znajduje się dziesięć publikacji, których Pan Jarosław Bomba jest współautorem. Liczba cytowań tych prac wg. bazy Web of Knowledge wynosi 79, a indeks Hirscha 4.

3. Dyskusja dotycząca uzupełnień rozprawy doktorskiej w stosunku do uwag dr hab. Tomasza Kozackiego zamieszczonych w recenzji z dnia 5-go kwietnia 2018 r.

Uwaga 1: Jak zaznaczono w części wstępnej recenzji z 2018 r., rozprawa doktorska dotyczy rozwiązania aktualnego i istotnego problemu badawczego. W pracy z 2018r nie zawarto motywacji wskazujących na zastosowania opracowanych struktur, lub zawarto ją bardzo szczątkowo. Należało uzupełnić motywację przez np. dodanie przykładów wykorzystania monolitycznych elementów optycznych z warstwami AR działającymi w reżimie fal terahercowych.

W rozprawie uzupełnionej rozdział 1.1 został znacznie rozbudowany. Praca opisuje szereg

¹ J. Bomba, J. Suszek, M. Makowski, A. Sobczyk, M. Sypek "3-D Printed Anti-Reflection Structures for the Terahertz Region" Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 2017

zastosowań struktur AR opracowanych dla promieniowania terahercowego. Mam jedną refleksję w stosunku do tej części pracy, a mianowicie jakie są zalety i wady rozwiązań literaturowych w stosunku do zaproponowanej warstwy AR opracowanej podczas realizacji doktoratu.

- Uwaga 2: W rozdziale 3 rozprawy z 2018r za pracą² przyjęto, że struktura AR bazująca na kształcie piramidy jest optymalna. Powinno się poddać dyskusji i porównać to rozwiązanie z innymi strukturami. Przyjęto również, że optymalny kształt struktury powinien charakteryzować się współczynnikiem kształtu o wartości w okolicach 2. Należy napisać skąd się ta wartość wzięła i czemu jest ona optymalną.

W rozprawie uzupełnionej profilowi optymalnemu poświęcono dwa rozdziały pracy 1.4 oraz 3.1. Rozdział 1.4 opisuje model teoretyczny opracowany w publikacji² oraz jego numeryczną implementację. Rozdział 3.1 wydaje się być wartościowym dodatkiem do pracy. Okazało się, że optymalny kształt nie odzwierciedla struktury piramidalnej. Przekrój struktury ma kształt bardziej złożony. Rozdział 3.1 przedstawia dyskretną implementację ciągłego profilu teoretycznego. Mam tu być może zasadne pytanie: czemu profil dyskretny, który odwzorowuje profil drukarki wykorzystywanej do technologicznej realizacji projektu, jest w dużej części kształtu profilu rozbieżny z profilem teoretycznym (patrz Rys. 32). Profil dyskretny wydaje się mieć kształt piramidalny.

- Uwaga 3 dotyczyła poszerzenia opisanego stanu wiedzy w rozprawie z 2018 r. o inne możliwe techniki fabrykacji warstw antyrefleksyjnych; pozwoliłoby to pokazać, czemu wybrano technikę druku 3D.

Zmiany wprowadzone w rozprawie dotyczące technik fabrykacji zostały zamieszczone w rozdziale 1.1. Uważam, że poszerzony stan wiedzy umożliwia zapoznanie się z tłem technologicznym wykonywania warstw AR dla promieniowania terahercowego.

- Uwaga 4: Należało rozszerzyć badania symulacyjne o następujące zagadnienia: (i) poddać dyskusji czy kąt polaryzacji fali zmienia wartość natężenia promieniowania odbitego, (ii) powinno się przeprowadzić symulacje dla różnych kątów ustawienia struktur badanych względem wiązki padającej.

Zmiany wprowadzone w rozprawie dotyczące zależności współczynnika odbicia zaproponowanej warstwy AR od kąta i polaryzacji wiązki padającej zostały zamieszczone w rozdziale 3.2.4 i 3.2.5. Przeprowadzone symulacje pokazują różnice wartości współczynników odbicia dla różnych kątów oświetlenia w zależności od polaryzacji. Udowadniają właściwości antyrefleksyjne struktury. Należałoby umieścić więcej wniosków wskazujących na różnice. Również opis tego rozdziału mógłby być bardziej precyzyjny. Symulacje przeprowadzono w zakresie częstotliwościowym 90 – 300 GHz z krokiem dyskretnym. Nie jest czytelne, w jaki sposób uzyskano wartości pokazane na wykresach – czy były to wartości uśredniane w badanym zakresie częstotliwościowym. Można się tego domyśleć na podstawie umieszczonych wniosków. Nie opisano również, w jaki sposób wyznaczono wartości w tabelach 1 i 2 mówiących o wzroście współczynnika transmisji.

- Uwaga 5 dotyczyła zależności zamieszczonych wyników symulacyjnych i eksperymentalnych od wyniku interferencji warstwy antyrefleksyjnej z warstwą po drugiej stronie elementu. W

² W. H. Southwell, "Pyramid-array surface-relief structures producing antireflection index matching on optical surfaces" Journal of the Optical Society of America A". 1991 Vol. 8, Issue 3, pp. 549-553

pracy badano element płaski o znanej grubości. Dla dowolnych, innych kształtów elementu, na którym umieszczona będzie struktura, wynik interferencji będzie miał inny wpływ. Dla przykładu możemy mieć do czynienia z efektem ogniskowania, gdzie rozkłady kolejno odbitych fal silnie się różnią. Dlatego należy pokazać wyniki symulacji bez efektu wielokrotnego odbicia, w tym przypadku wiązka oświetlająca oraz badane pole odbite znajdowałoby się w materiale substratu. Taka symulacja pokazywałaby wartość spadku mocy wiązki odbicia od jednej struktury. Byłaby niezależna od geometrii elementu, na którym struktura będzie nałożona.

Aby zbadać wpływ grubości podłoża na współczynnik odbicia dodano trzy rozdziały. Rozdział 3.2.6 bada efekt grubości podłoża. Rozdziały 3.2.7 i 3.2.8 opisują symulacje, które badają własności struktury z pominięciem podłoża i z pominięciem odbicia od drugiej krawędzi struktury. Uważam, że zawarte badania są wyczerpujące.

- Uwaga 6: Należało rozszerzyć badania eksperymentalne o różne kąty ustawienia wiązki oświetlającej względem badanej struktury.

W odpowiedzi na tę uwagę przeprowadzono szereg eksperymentów. Przeprowadzone eksperymenty udowodniły, że struktura zachowuje swoje właściwości w bardzo szerokim zakresie kątowym. Uważam, że eksperyment jest bogaty, a zawarte badania z pewnością były technicznie i czasowo bardzo wymagające.

- Uwaga 7: Opracowane struktury antyrefleksyjne badane są „jako zawieszony w powietrzu”, w rzeczywistości będą częścią składową elementu. Uwaga dotyczyła dyskusji połączenia warstwy z elementem oraz rozszerzenia badań o tego typu elementy.

Uzupełnienia dotyczące tego elementu recenzji znajdują się w rozdziale 3.2.8. Rozdział jest bardzo ciekawy. Przedstawiono wyniki badań zastosowania warstwy AR umieszczonej na elemencie ogniskującym. Wykazano, że warstwa AR poprawiła własności energetyczne elementu ogniskującego.

4. Podsumowanie

Bazując na podstawie uzupełnionej rozprawy mogę stwierdzić, iż jej wykonanie wymagało od Doktoranta dogłębnego zrozumienia zjawisk zachodzących podczas propagacji terahercowego promieniowania elektromagnetycznego, a także opanowania szerokiego zakresu wiedzy z optyki oraz profesjonalnego posługiwania się eksperymentem, algorytmiką podczas opracowania rozwiązania technologicznego i jego ewaluacji. Zdobyta wiedza pozwoliła Doktorantowi na samodzielne zaprojektowanie, wykonanie prototypu, badania numeryczne i eksperymentalne pozwalające na opracowanie nowatorskiego rozwiązania technologicznego.

Uważam, iż przedstawione w pracy wyniki badań spełniają w pełni wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie magistra Jarosława Bomby do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

