Warszawa, 10.01 2021 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

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ I FIZYKI TECHNICZNEJ
DNIA 02 -02- 2021 DNIA
WPŁYNĘŁO
DF-63/R./2021

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Grześkiewicza

pt. „Planarne absorbery metamateriałowe dla promieniowania elektromagnetycznego z zakresu terahercowego"

1. Wprowadzenie i przedmiot recenzji

Recenzja niniejszej rozprawy doktorskiej została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej. Promotorem pracy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Grześkiewicza jest dr hab. Eryk Wolarz, prof. uczelni. Praca dotyczy absorberów metamateriałowych.

Idealne absorbery wykonane na bazie struktur metamateriałowych są od co najmniej kilkunastu lat „gorącym tematem" badawczym wielu zespołów naukowych na świecie. Pierwsze badania idealnego metamateriałowego absorbera opisano ponad 20 lat temu, a obecne badania prowadzone są głównie w kierunku ulepszania technik wykonania tego typu absorberów i doskonalenia ich właściwości absorpcyjnych w różnym zakresie długości fal. Absorbery dla zakresu terahercowego są tym bardziej interesujące, ponieważ coraz częściej pojawiają się urządzenia fotoniczne o ciekawych właściwościach wykorzystujące zakres promieniowania od 1 – 10 THz. Doktorant zajął się głównie zakresem węższym tj. 0,1 – 3,0 THz, prawdopodobnie ze względu na dostępność odpowiedniego zakresu spektrometru TDS. Należy zaznaczyć, że od kilku lat dostępne są również w Polsce TDS na szerszy zakres 1,0 – 10,0 THz.

Ważność tego zagadnienia jest widoczna w postaci licznych publikacji oraz wielu referatów i posterów, z jakimi się spotykam na wielu międzynarodowych konferencjach dotyczących metamateriałów. Dlatego uważam za niezwykle interesujące i ważne podjęcie przez doktoranta tematu projektowania i badania absorberów metamateriałowych.

Idealny absorber powinien mieć zarówno maksymalną absorpcję w żądanym przedziale fal, jak również odpowiednią impedancję dopasowaną do otoczenia, w którym się znajduje, np. powietrza. Jeśli istnieje niedopasowanie impedancji, zawsze będzie występować odbicie, które jest oczywiście niepożądane dla idealnego absorbera. Impedancja falowa zależy od stosunku między przenikalnością elektryczną a przenikalnością magnetyczną. Krótko mówiąc, aby uzyskać doskonały absorber, musimy jednocześnie zminimalizować transmisję i współczynnik odbicia. Uwarunkowania te dotyczą nie tylko absorberów z zakresu terahercowego, ale również struktur działających w innych zakresach fal.

2. Zakres pracy i ocena merytoryczna

Badania, które podjął Doktorant, mają walor poznawczy jak również mogą stanowić podstawę do dalszych rozwiązań praktycznych. W pracy rozważane są dwa typy absorberów – odbiciowe i transmisyjne. Absorbery te charakteryzują się selektywną absorpcją najczęściej w postaci piku absorpcji dla danej częstotliwości. Położenie tego piku jest zależne od kształtu pojedynczego elementu metamateriałowego, rozmieszczenia elementów struktury względem siebie oraz rodzaju materiałów, szczególnie ich parametrów przenikalności elektrycznej i magnetycznej, a także ich grubości i rodzaju podłoża na jakim wykonywane są struktury. Dodatkowo w strukturę przetwornika metamateriałowego wkomponowana jest warstwa ciekłokrystaliczna umożliwiająca przestrajanie piku rezonansowego przy wykorzystaniu pola elektrycznego. Auror pracy doktorskiej zaprojektował struktury metamateriałowe, wykonał symulacje i pomiary ich właściwości elektromagnetycznych. Symulacje zostały wykonane przy wykorzystaniu szeroko rozpowszechnionego oprogramowania CST, a pomiary właściwości spektralnych metodą TDS.

Układ rozprawy jest klasyczny. Rozprawa liczy 111 stron, zawiera 50 często wielopanelowych rysunków, 1 tabelę i cytowane 62 pozycje bibliograficzne. Rozprawa podzielona jest na 7 rozdziałów, ponadto zawiera spis treści oraz wykaz używanych w pracy symboli wraz z objaśnieniami.

Praca rozpoczyna się wstępem, w którym doktorant przekonuje o ważności podjętego zadania, definiując pojęcia związane z metamateriałami. W części literaturowej przedstawione zostały zagadnienia związane z obszarem badań podejmowanym w rozprawie. Autor podaje podstawowe informacje dotyczące metamateriałów i ich właściwości. Literatura dotycząca tematu dobrana jest poprawnie, a cytowania najważniejszych prac właściwe Przedstawiona w sposób rzetelny analiza zagadnień podejmowanych w pracy w oparciu o dane literaturowe świadczy o bardzo dobrym rozpoznaniu tematu i przygotowaniu doktoranta do prowadzania pracy naukowej oraz realizacji zamierzonych badań. Zjawiska oddziaływania fal elektromagnetycznych ze strukturami metamateriałowycmi opisane są dość szczegółowo i poprawnie, co świadczyć może, że mgr inż. Grześkiewicz rozumie fizykę badanych zjawisk.

W rozdziale drugim opisane zostały najważniejsze zasady i wnioski wynikające z teorii elektromagnetyzmu dotyczące rozważanych w pracy absorberów.

W rozdziale trzecim przedstawiono technologię wytwarzania metamateriałowych absorberów terahercowych oraz zamieszczono zbiorcze zestawienie wszystkich wytworzonych i będących przedmiotem pracy doktorskiej absorberów.

Rozdział czwarty dotyczy stosowanych w pracy doktorskiej metod badawczych. Omówiono w nim metodę spektroskopii terahercowej w dziedzinie czasu oraz zagadnienia symulacji numerycznych i wyznaczania parametrów metamateriałów metodą macierzy przejścia.

Rozdział piąty zawiera wyniki badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych odbiciowych i transmisyjnych metamateriałowych absorberów terahercowych. W tym rozdziale przedstawiony też został również model koncepcyjny przestrajalnego dynamicznie metamateriaowego absorbera terahercowego zawierającego dodatkową dielektryczną warstwę ciekłokrystaliczną.

Jest to najbardziej istotna część pracy. W tym rozdziale doktorant w sposób szczegółowy przedstawia uzyskane wyniki badań. Mgr inż. Grześkiewicz zaprojektował szereg struktur metamateriałowych realizujących funkcje absorberów terahercowych. Komórka elementarna sieci tych metamateriałów składa się z elementów metalowych położonych na dwóch równoległych powierzchniach, oddzielonych warstwą dielektryka, wykonanych na podłożu krzemu o dużej rezystywności. Symulacje numeryczne pozwoliły wyznaczyć współczynniki transmisji i odbicia fal elektromagnetycznych na granicy ośrodka metamateriałowego i próżni oraz absorpcję promieniowania terahercowego przez strukturę metamateriałową w funkcji częstotliwości. Analiza numeryczna potwierdziła występowanie silnej, selektywnej absorpcji promieniowania terahercowego przez zaprojektowane metamateriały. Doktorant przeprowadził również analizę oddziaływań fal terahercowych z rozważanymi metamateriałami posługując się modelem linii transmisyjnej.

Właściwości absorpcyjne absorberów mogą być w szerokim zakresie modyfikowane na etapie ich wytwarzania. Ich właściwości absorpcyjne zależą między innymi od kształtu SRR, odległości pomiędzy podstawowymi komórkami metamateriału, grubości i właściwości elektrycznych metalu oraz warstwy dielektrycznej rozdzielającej warstwy metalowe. W przedstawionym w pracy rozwiązaniu zaproponowano dodatkową warstwą ciekłokrystaliczną umożliwiająca przestrajanie całkowitej przenikalności elektrycznej struktury metamateriałowej przetwornika polem elektrycznym poprzez zmianę orientacji ciekłego kryształu. Takie rozwiązanie jest możliwe od strony technicznej przy założeniu, że grubość warstwy ciekłokrystalicznej mieści się w zakresie od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie uzyskanych rezultatów oraz wnioski. Zdaniem recenzenta w podsumowaniu Doktorant opisał wiele szczegółowych zależności jakie zaobserwował dla badanych struktur (str. 98 – 104), jednak brak jest w wielu przypadkach szerszego odniesienia się jakie są przyczyny tych obserwowanych zależności i większego uogólnienia tych wniosków, tam , gdzie jest to możliwe, np.

1. ……"Jak się okazuje, w celu zminimalizowania wpływu stacjonarnego pola elektromagnetycznego bliskiego zasięgu występującego na zewnątrz absorbera tuż przy jego powierzchni na wynik symulacji numerycznych, konieczne jest wprowadzenie dodatkowych warstw próżni o zoptymalizowanej grubości" (str.98). Dlaczego? Czy to obowiązuje tylko w tym przypadku tej symulowanej struktury, czy też wszystkich struktur metamateriałowych ?
2. „Dla porównania przeprowadzono również symulacje numeryczne dla wyodrębnionych z absorbera 2C-t struktur SRR i CW. W widmach odbicia i transmisji struktur SRR i CW występują pasma odpowiadające obszarom rezonansowym jednak obliczona na ich podstawie absorpcja w obu przypadkach jest stosunkowo mała" (str. 99). Dlaczego? Co może być przyczyną takich właściwości tych struktur?
3. „Próbne dopasowania charakterystyki linii transmisyjnej do widm odbicia i transmisji TMA uzyskanych z symulacji numerycznych pozwoliły stwierdzić, że takie dopasowanie nie jest możliwe w całym rozpatrywanym zakresie częstotliwości. Na tej podstawie można stwierdzić, że model prostej linii transmisyjnej ma ograniczone znaczenie przy analizie absorberów 2C-t" (str. 99). Przydałaby się choćby hipoteza dlaczego tak się dzieje?.

Jak sam autor podkreśla w podsumowaniu (str. 97 i 98), tu cytat: „Oryginalnym wkładem autora rozprawy doktorskiej związanym z metodą wyznaczania parametrów elektromagnetycznych metamateriałowych absorberów terahercowych na podstawie parametrów macierzy rozpraszania jest wprowadzenie poprawek do wzorów wiążących te parametry 98 podanych przez Smitha i in. [40, 41]. Poprawki te uwzględniają w symulacjach numerycznych warstwy próżni między powierzchniami absorbera i zdefiniowanymi portami, dla których obliczane są parametry macierzy rozpraszania. Jak się okazuje, w celu zminimalizowania wpływu stacjonarnego pola elektromagnetycznego bliskiego zasięgu występującego na zewnątrz absorbera tuż przy jego powierzchni na wynik symulacji numerycznych, konieczne jest wprowadzenie dodatkowych warstw próżni o zoptymalizowanej grubości". Zrozumienie tej części pracy (rozdz. 4.2.1 i 4.2.2) związanej z opisem analitycznym struktur metamateriałowych i ich oddziaływaniem z materią (str. 38 – 47) sprawiło recenzentowi największy problem, głownie ze względu na skrótowe ich potraktowanie w pracy, jak również konieczność zapoznania się z literaturą źródłową tj. pozycjami 36, 40, 42 i 43 zawartymi w spisie literatury na str. 110. Recenzent ma nadzieję, ze doktorant odniesie się w referacie na obronie i wyjaśni na czym w istocie polegało to „istotne rozszerzenie w stosunku do zaprezentowanych wcześniej związków" (konstytutywnych) opisujących symulowane warstwy (str. 38 i 39). Mimo przestudiowania wspomnianych pozycji literaturowych recenzentowi nie udało się wyjaśnić, skąd wynika potrzeba uwzględnienia w modelu wykorzystywanym do symulowania „pomiędzy warstwami absorbera i portami dodatkowych warstw próżni". Pytanie brzmi: czy zasada ta dotyczy tylko symulacji przeprowadzonych w niniejszej rozprawie doktorskiej czy też jest bardziej uniwersalna i powinna być uwzględniana w każdej symulacji struktury metamateriałowej?

Praca napisana jest poprawnym, technicznym językiem, a redakcja składna i przejrzysta. Jedyne, co sprawiło trochę trudności recenzentowi, to opis w podsumowaniu właściwości badanych struktur metamateriałowych, gdzie występuje odwołanie się do ich nazw, lecz bez odniesienia się gdzie w tekście pracy są one opisane (str. 96 – 104).

3. Uwagi ogólne i dyskusyjne

Recenzent ma obowiązek przedstawić również uwagi krytyczne, wskazujące na to, że istotnie zapoznał się z przedstawianą pracą, dlatego też poniżej przedstawiam spostrzeżenia, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy doktorskiej, a które dotyczą zarówno teoretycznej i doświadczalnej rozprawy. Muszę ustosunkować się również do jakości uzyskanych wyników, poprawności opisu metod badawczych, interpretacji wyników i wyciąganych na ich podstawie wniosków. W tej części recenzji chciałbym skupić się na zagadnieniach merytorycznych i chciałbym by Autor rozprawy, przynajmniej do niektórych z nich ustosunkował się w części obrony poświęconej odpowiedziom recenzentów.

1. Zapisany na str. 12 cel pracy określony jako "....wytworzenie planarnych metamateriałowych absorberów terahercowych i zbadanie właściwości....." jest, zdaniem recenzenta, zbyt ogólny, nie wspominając o braku tezy, (Ph. D. Thesis !). Recenzent zdaje sobie sprawę, ze w naukach technicznych czasami jest dość trudno taką tezę postawić. Tak sformułowany cel nie precyzuje ściśle zagadnień,

jakie doktorant powinien rozwiązać w pracy i nie pokazuje co powinien udowodnić.

2. Sformułowania absorber transmisyjny i odbiciowy są według recenzenta, użyte tylko na potrzeby tej pracy, ponieważ w literaturze (przynajmniej tej, do której dotarł recenzent) nie ma takich podziałów. Jeśli materiał (powierzchnia) absorbuje, zwłaszcza w znacznym stopniu, to zazwyczaj bardzo słabo odbija promieniowanie i odwrotnie. W anglojęzycznej literaturze naukowej można co prawda znaleźć sformułowania „transparent absorber", ale w zasadzie najczęściej używane jest określenie perfekcyjny absorber „perfect absorber". Odnośnie dobicia najczęściej spotyka się sformułowania jako „metapowierzchnia wykazująca absorbcję i kontrolowane odbicie".
3. Recenzent nie znalazł w pracy uzasadnienia wyboru kształtu struktur metamateriałowych, mimo, że Doktorant wspomina na str. 10, że były to przeskalowane struktury z zakresu GHz oraz, że wzorowano się „na materiałach zaprojektowanych i wytworzonych na początku pierwszego dziesięciolecia obecnego wieku". Można by zadać pytanie, ale dlaczego właśnie struktury o takim kształcie zostały wybrane? Skalowanie struktur metamateriałowych występuje praktycznie w całym zakresie widmowym, aczkolwiek w różnych zakresach widma nieco inne zjawiska fizyczne decydują o właściwościach struktur metamateriałowych. Znając dane literaturowe można by bardziej ściślej określić czy mają to być badane absorbery wąskopasmowe, szerokopasmowe czy też typu wielopasmowych (multiband).
4. W części opisującej oddziaływanie fal elektromagnetycznych z metamateriałami brak jest, zdaniem recenzenta, opisu zachowania się fal na granicy metal – dielektryk odnośnie choćby relacji pomiędzy składowymi równoległymi i prostopadłymi natężeń pola elektrycznego i indukcji elektrycznej do warstwy itd. Zamieszczenie takiego opisu pozwoliłoby na bardziej precyzyjną interpretację obserwowanych zjawisk w badanych metastrukturach.
5. Wykresy absorpcji zamieszczone w pracy mają wartość maksymalną równą 1. Należy rozumieć, że absorpcji podane na wykresach są wartościami względnymi absorpcji normalizowanymi do jedności. Jak wiadomo absorpcja jest wartością logarytmiczną i jej wartość może być zarówno mniejsza jak i większa od jedności. Na wykresach zawartych w pracy, wartość maksymalna absorpcji wynosi jeden i doktorant przyjmuje, że gdy absorpcja przyjmuje wartość 1 to wtedy mamy absorber idealny. Należałoby to wyraźnie w pracy podkreślić. Inaczej jest z transmisją, gdzie wartość równa jeden oznacza 100% transmisji próbki.
6. Pomieszane są wnioski ogólne wynikające z przeprowadzonych badań (i niekiedy całkiem oczywiste) np. „Położenie, wysokość i szerokość połówkowa piku absorpcyjnego dla badanych absorberów zależą od ich stałych sieciowych oraz rozmiarów struktur metalowych występujących w komórkach elementarnych, a także od grubości warstwy dielektrycznej z wnioskami szczegółowymi i np. „Ten wynik wskazuje na ścisły związek piku absorpcyjnego występującego dla absorbera Krzyż-t w dolnym zakresie częstotliwości terahercowych…..", aby

można było na podstawie tych wniosków projektować podobne struktury metamateriałowe na zakres terahercowy (str.106) .

7. We wszystkich strukturach metamateriałowch badanych w pracy Doktorant wykorzystywał fotorezyst o nazwie handlowej SU-8. Z tego dielektryka wykonywane były warstwy o różnej grubości. Recenzent nie znalazł w pracy, jakie wartości przenikalności elektrycznej posiadał ten dielektryk i jakie jego parametry były uwzględniane w symulacjach.
8. Na zakończenie pracy (str. 99) Doktorant odnosi się do zakresu 2 – 7 THz, chociaż praktycznie w pracy eksponowany był zakres 0,1 – 3,0 THz.
9. Brak jest, zdaniem recenzenta, szerszego odniesienia uzyskanych rezultatów do wyników podobnych badań opisanych w literaturze, czyli co zrobili inni i jak się mają rezultaty jego badań do tych prezentowanych w literaturze.
10. Przestrojenie absorbera z wykorzystaniem ciekłego kryształu 1825 zsyntezowanego w WAT było niezbyt duże ok. 4% (str.104), mimo relatywnie dużej wartości współczynnika załamania materiału ciekłokrystalicznego. Zastosowanie grubszej warstwy tego materiału dałoby z pewnością większą wartość przestrojenia.

W zasadzie brak jest w pracy większych uwag redakcyjnych, chociaż można tu niektóre przytoczyć np. w tabeli 3.1 (str. 27) brak jest jednostek w jakich podano wymiary próbek, SRR to skrót od Split Ring Resonator, a nie Rectangle jak napisano na str. 51, opis osi na rys. 5.10 wykonano w języku angielskim (str. 65 i 66) a powinien być w języku polskim, jak jest to na innych rysunkach zawartych w pracy oraz błąd literowy na str. 105 w przedostatnim wersie, itp.

4. Podsumowanie

Na dorobek publikacyjny doktoranta związany z tematem pracy doktorskiej składają się 2 prace w czasopismach z listy JCR oraz 3 prace opublikowane w wydawnictwach konferencyjnych i jedna w czasopiśmie polskim. Doktorant prezentował wyniki swoich prac na 7 konferencjach międzynarodowych. Brał udział w kilku projektach badawczych w tym, w dwóch jako kierownik oraz dwóch stażach naukowych. Dorobek naukowy jest wystarczający, chociaż publikacyjnie niezbyt imponujący. Dla porządku dodać należy, że zgodnie z wymaganiami ustawowymi przy realizacji pracy doktorskiej dorobek publikacyjny nie jest wymagany.

Przedstawione powyżej uwagi krytyczne nie umniejszają jednak mojej końcowej, pozytywnej oceny rozprawy. Podsumowując uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Bartłomieja Grześkiewicza, zawiera duży ładunek udokumentowanych nowości naukowych z zakresu absorberów metamateriałowych o znaczeniu poznawczym oraz niewykluczone, że może również aplikacyjnym. Należy raz jeszcze podkreślić, że Doktorant podjął się badania bardzo interesującego zjawiska, które jest ważne dla rozwoju techniki terahercowej.

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

Prof. dr hab. inż. Janusz Parka