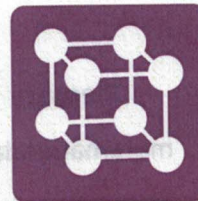




POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ I FIZYKI TECHNICZNEJ
RADA DYSCYPLINY INŻYNIERIA MATERIAŁOWA

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. +48 61 665 3233, fax: 48 61 665 3201
e-mail: office_dtpf@put.poznan.pl, www.put.poznan.pl



dr hab. Arkadiusz Ptak, prof. PP
Instytut Fizyki
e-mail: arkadiusz.ptak@put.poznan.pl
tel.: +48 61 665-3233



DF-63/5/2021

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgra inż. Bartłomieja Grześkiewicza

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

Niniejsza recenzja sporządzona została na prośbę Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej. Promotorem w przewodzie doktorskim jest dr hab. Eryk Wolarz, prof. PP.

Rozprawa doktorska mgra inż. Bartłomieja Grześkiewicza poświęcona jest badaniom metamateriałowych absorberów terahercowych (TMA). W szczególności badane były ich właściwości spektroskopowe (ściśle: odbiciowe, transmisyjne i absorpcyjne) oraz właściwości elektromagnetyczne określone poprzez parametry takie jak: impedancja falowa, przenikalność elektryczna i przenikalność magnetyczna. W pracy przedstawiony został również model numeryczny dynamicznie przestrajalnego TMA, w którym zastosowano dodatkową warstwę ciekłokrystaliczną.

Tematyka absorberów terahercowych jest aktualna, wpisująca się w szerszy nurt badań nad metamateriałami, które prowadzone są od około 20-30 lat, ciesząc się dużym zainteresowaniem fizyków i inżynierów, ze względu na szerokie możliwości zastosowań tej grupy materiałów.

Temat rozprawy jest zwięzły, prawidłowo opisuje zawartość pracy. Układ rozprawy jest typowy, treść podzielona została na 7 rozdziałów, które poprzedzone są streszczeniami w języku polskim i angielskim.

Pierwszy rozdział stanowi wstęp, w którym przedstawiono rys historyczny badań nad metamateriałami, koncepcję terahercowych absorberów oraz cel pracy. Ten ostatni został sformułowany dość ogólnikowo, jako wytworzenie planarnych TMA oraz zbadanie ich właściwości odbiciowych, transmisyjnych i absorpcyjnych, bez określenia konkretnego problemu naukowego do rozwiązania. W dalszych częściach pracy Autor stawia jednak konkretne pytania dotyczące wpływu kształtu elementów strukturalnych oraz grubości poszczególnych warstw na charakterystykę spektralną TMA oraz – po analizie – udziela na nie odpowiedzi, czym uzasadnia celowość podjętych badań. Wracając do wstępu, w moim odczuciu zabrakło w nim informacji o znaczeniu promieniowania terahercowego, jego specyfice w stosunku do sąsiednich zakresów promieniowania elektromagnetycznego (mikrofalowego i podczerwieni) oraz wynikających stąd obecnych i potencjalnych zastosowań.

W rozdziale drugim opisane zostały właściwości elektromagnetyczne metamateriałów. Punktem wyjścia są równania Maxwella uzupełnione o tzw. związki konstytutywne. Opis jest przejrzysty, wręcz podręcznikowy, co w tym przypadku – przedstawienia podstaw teoretycznych – należy traktować jako zaletę.

W kolejnym rozdziale Autor opisał sposób wytworzenia oraz podstawowe cechy badanych w pracy doktorskiej planarnych TMA, zamieścił także ich zbiorcze zestawienie. Planarne TMA zostały wytworzone według projektu Doktoranta w Instytucie Technologii Materiałów Elektronowych (Oddział w Piasecznie).

W rozdziale 4 Autor przedstawia dwie podstawowe metody badawcze zastosowane w pracy doktorskiej: eksperymentalną – spektroskopię terahercową w domenie czasu oraz metodę symulacji numerycznych. Pierwsza z metod omówiona została na przykładzie konkretnego modelu spektrometru terahercowego TPS Spectra 3000 firmy TeraView znajdującego się w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, gdzie zostały przeprowadzone pomiary. Nie do końca jest jasne, jak duży był udział Doktoranta w tych pomiarach; zakładam, że w większości zostały wykonane podczas stażu Doktoranta w tym ośrodku. Z opisu drugiej z metod jednoznacznie wynika dominujący udział Doktoranta w tych badaniach. Sam opis jest logiczny i wskazuje na dobrą znajomość tematyki przez Autora. Za główne osiągnięcie w tym zakresie badań należy uznać wyprowadzenie związków konstytutywnych wiążących parametry macierzy rozpraszania (S_{ij}) z parametrami elektromagnetycznymi TMA: n – współczynnikiem załamania światła (fali

terahercowej), Z – impedancją falową. Osiągnięcie zostało opublikowane w artykule Grześkiewicz *et al.*, *Opto-Electronics Review* 2018 [43], będącym w pewnym stopniu rozszerzeniem w stosunku do wcześniejszej pracy Smitha *et al.* [42]. Symulacje numeryczne przeprowadzone zostały za pomocą pakietu CST Studio Suite, w szczególności modułu Microwave Studio.

W rozdziale 5 zawarte zostały wyniki pomiarów i obliczeń oraz ich dyskusja. Autor w kolejnych podrozdziałach omówił badane TMA, począwszy od absorbera 2C-t (gdzie 2C oznacza kształt rezonatora – podwójne C, a mała litera t – jego typ, w tym przypadku – transmisyjny), 2C-r (r – oznacza odbiciowy), następnie Kwadrat-t oraz Krzyż-t. Zamieszczenie rys. 5.1 przedstawiającego schematycznie pierwszy z absorberów, wydaje się niepotrzebne, gdyż absorber ten został już przedstawiony w podrozdziale 3.2 zestawiającym schematy oraz obrazy z mikroskopu konfokalnego wszystkich badanych absorberów. W ostatnim podrozdziale Doktorant przedstawił model przestrajalnego dynamicznie absorbera z ciekłokrystaliczną warstwą dielektryczną (TMA LC-2C-r).

Przedostatni rozdział stanowi podsumowanie, które niestety powtarza wiele treści wstępu, w szczególności motywację i opisy zawartości pracy. Tutaj należało raczej skupić się na podsumowaniu głównych wyników uzyskanych w ramach pracy doktorskiej.

W ostatnim rozdziale Autor zawarł wnioski z przeprowadzonych badań. Jedynie pierwszy akapit odbiega treścią i moim zdaniem, lepiej byłoby go przenieść do Podsumowania. Za najważniejsze wnioski można uznać:

- 1) Pojedynczy pik, występujący w widmach absorpcji wszystkich badanych TMA, związany jest z rezonansem indukcyjno-pojemnościowym, który jest charakterystycznym dla metamateriałów tworzonych przez struktury metalowe ułożone w dwóch warstwach rozdzielonych warstwą dielektryczną.
- 2) Położenie oraz wielkość piku absorpcyjnego (wysokość i szerokość połówkowa) zależą od stałych sieciowych oraz rozmiarów struktur metalowych występujących w komórkach elementarnych, a także od grubości warstwy dielektrycznej.
- 3) Dla TMA z czterokrotną osią symetrii komórki elementarnej prostopadłą do ich powierzchni, absorpcja nie zależy od kierunku polaryzacji liniowej fali terahercowej.
- 4) Dla transmisyjnych TMA istnieje możliwość wyznaczenia ich efektywnych parametrów elektromagnetycznych, takich jak: impedancja falowa, współczynnik załamania,

przenikalność elektryczna oraz przenikalność magnetyczna, na podstawie parametrów macierzy rozpraszania S uzyskanych z symulacji numerycznych.

5) Rozważane TMA charakteryzują się częstotliwością graniczną, mniejszą od częstotliwości maksimum pików absorpcyjnego, poniżej której posiadają właściwości typowe dla naturalnych materiałów. Powyżej częstotliwości granicznej wykazują właściwości charakterystyczne dla metamateriałów.

6) W przypadku absorbera Kwadrat-t największy udział w absorpcji promieniowania terahercowego ma warstwa dielektryczna SU-8.

7) Symulacje numeryczne przeprowadzone dla TMA zawierającego warstwę ciekłego kryształu wskazują, że przesunięcie pików absorpcyjnego na skali częstotliwości jest stosunkowo niewielkie (około 4%).

Autor wskazuje również na potencjalne zastosowania badanych TMA, w szczególności do detekcji promieniowania terahercowego: jako elementy układów bolometrycznych lub jako selektywne układy antenowe.

Podstawowe pytanie, które nasuwa się po przeczytaniu rozprawy jest następujące. Dlaczego do wytworzenia TMA nie został zaprojektowany tzw. absorber idealny ($A_{\max} \approx 1$), o parametrach wynikających z symulacji numerycznych, np. o większej grubości warstwy dielektrycznej SU-8 niż $7 \mu\text{m}$? Czy należy przez to rozumieć, że większość symulacji została przeprowadzona już po wykonaniu absorberów? A może Autor planuje wykonanie takiego absorbera w przyszłości?

Szczegółowe pytania i uwagi:

1. Dlaczego w wielu symulacjach grubość podłoża krzemowego modelu absorbera wynosi tylko $12 \mu\text{m}$ lub $50 \mu\text{m}$ (w przypadku symulacji rozkładu gęstości strumienia elektromagnetycznego), podczas gdy grubość podłoża krzemowego rzeczywistego absorbera wynosi $550 \mu\text{m}$? Jaki to ma wpływ na wyniki symulacji?
2. W jaki sposób „osadzono” (jak określa to Autor na str. 20) warstwę SiO_2 na monokryształach krzemu? W atmosferze tlenu (powietrza) warstwa tlenku krzemu powstaje samorzutnie na krzemie (tzw. warstwa natywna), ale jej grubość jest mniejsza niż 10 nm , zwykle ok. $2\text{-}3 \text{ nm}$.
3. Jaka była wartość kroku czasowego przyjęta w symulacjach propagacji sygnału (str. 48)?

4. W symulacjach z modelem TMA LC-2C-r przestrajalnym dynamicznie (str. 93) nie uwzględniono separatorów oraz warstw polimerowych gwarantujących odpowiednią wstępną orientację ciekłego kryształu. Czy uwzględnienie, w szczególności warstw polimerowych, nie spowodowałoby zmniejszenia skali przeorientowania LC, a tym samym zmniejszenia efektu przestrajania? Jaki był powód nieuwzględnienia tych warstw?

Pod względem językowym, w tym gramatycznym i stylistycznym, rozprawa została przygotowana poprawnie, bez większych nieprawidłowości. Mam natomiast wątpliwości dotyczące terminologii. Otóż Autor używa tych samych pojęć: absorpcja, odbicie i transmisja, zarówno opisując zjawiska, jak i miarę tych zjawisk, np. na wykresach: rys. 5.3, 5.4, 5.5. Co ciekawe, w publikacjach anglojęzycznych, Autor używa pojęć: *reflectance* i *transmittance*, czyli w języku polskim powszechnie przyjęte: „współczynnik odbicia” i „transmitancja”. Ponadto przedstawiając wykresy w rozprawie również czasami używa terminów anglojęzycznych, np. na rys. 5.10 i 5.11. Zabrakło trochę konsekwencji w używaniu pojęć, niemniej nie wpłynęło to na zrozumienie strony merytorycznej.

Błędów i usterek edytorskich jest niewiele, z obowiązku recenzenta wymieniam kilka:

- rys. 3.2–3.3 – oznaczenia wymiarów; zamiast a poprzecznego powinno być d ;
- rys. 3.5 – zamiast d powinno być h ;
- s. 39 – niepoprawne numery wzorów w tekście; zamiast (4.7) i (4.8), powinno być (4.6) i (4.7);
- rys. 5.10(c), 5.11(c), 5.12(c) – oznaczenie linii dla danych eksperymentalnych i symulacji jest takie samo.

Przytoczone uchybienia oraz nieścisłości, nie umniejszają znacząco wartości rozprawy, którą oceniam jako rzetelnie wykonaną, zarówno pod względem merytorycznym, jak i redakcyjnym. Doktorant opracował modele metamateriałowych absorberów terahercowych, a następnie zastosował metody eksperymentalne, w tym przede wszystkim spektroskopię terahercową w domenie czasu, a także symulacje numeryczne, uzyskując spójny zestaw wyników pomiarowych. Wyniki poddał starannej analizie porównawczej, podając wyjaśnienia większości różnic pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a wynikami symulacji. Dokonał również oceny wytworzonych absorberów pod względem ich potencjalnych zastosowań. W opisach materiałów i metod oraz w dyskusji wyników odnosił

się do trafnie wybranych źródeł literaturowych. Ostatecznie, poprawnie sformułował wnioski, które wraz z uzyskanymi wynikami z pewnością stanowią istotny wkład w badania nad metamateriałowymi absorberami terahercowymi. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w dwóch artykułach, które ukazały się w czasopismach z listy JCR, a także w *Przeglądzie Elektrotechnicznym* oraz w materiałach konferencyjnych. We wszystkich tych artykułach Doktorant był pierwszym autorem.

Biorąc pod uwagę powyższą ocenę stwierdzam, że rozprawa spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie mgra inż. Bartłomieja Grześkiewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Arkadiusz Ptek