



WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI
I INFORMATYKI

dr hab. inż. Rafał Lech, prof. PG

Politechnika Gdańska

Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki

Katedra Inżynierii Mikrofalowej i Antenowej

Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

2 stycznia 2025

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: Accurate Methods of Characterization of Conductive Layers and Dielectric Samples at Millimeter-Wave and THz Frequencies

Autor rozprawy: mgr inż. Jerzy Cuper

Recenzję przygotowano na podstawie Uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej nr 864/1/2024 r., z dnia 19 listopada 2024 r. Recenzja została sporządzona wg zaleceń przekazanych przez Politechnikę Warszawską. W szczególności ocenia ona spełnienie przez rozprawę doktorską warunków określonych w art. 187 ust. 1–2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r.

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Rozprawa doktorska mgr. inż. Jerzego Cupera dotyczy zagadnień charakteryzacji materiałów przewodzących w paśmie fal milimetrowych oraz dielektrycznych w paśmie fal terahercowych. Doktorant w rozprawie sprecyzował dwa cele:

- Opracowanie metody pomiaru przewodności w paśmie milimetrowym opartej na rezonatorze Fabry'ego-Pérota.
- Opracowanie metody pomiaru zespolonej przenikalności elektrycznej w paśmie terahercowym opartej na rezonatorze Fabry'ego-Pérota.

Aby to osiągnąć Autor wykorzystał metodę opartą na macierzy rozproszenia do symulacji widmowej wydajności wnek. Wykorzystanie wielorodzajowych, otwartych wnek Fabry'ego-

Pérota pozwoliło Doktorantowi na opracowanie metody pomiarowej, która zapewnia większą czułość, dokładność, powtarzalność, szerokopasmowość i niezawodność względem innych znanych i stosowanych metod.

W rozprawie nie zostały niestety sprecyzowane tezy badawcze, które są fundamentem pracy naukowej i charakterystycznym elementem każdej rozprawy. Niemniej jednak, rozpatrywane w pracy zagadnienie naukowe jak i cele pracy zostały jasno i precyzyjnie sformułowane przez autora.

Praca ma charakter praktyczny i ukierunkowana jest na stworzenie układów pomiarowych i opracowanie dedykowanych procedur do charakteryzacji materiałów. Rozprawa składa się z wprowadzenia, pięciu rozdziałów i pięciu dodatków. We wprowadzeniu, będącym pierwszym rozdziałem rozprawy, Autor przedstawił cele i zakres pracy oraz motywy podjęcia badań związanych z tematyką rozprawy. Rozdział drugi traktuje o znanych technikach pomiarowych materiałów przewodzących i warstw dielektrycznych. W tym rozdziale Doktorant przedstawia stan wiedzy w tematyce charakteryzacji materiałów, opisuje model wnęki Fabry'ego-Pérota i jej wykorzystanie do pomiaru materiałów przewodzących i cienkich warstw dielektrycznych. W rozdziale trzecim zawarty jest opis zaproponowanej przez Autora metody pomiaru materiałów przewodzących z uwzględnieniem źródeł niepewności pomiarowej. Rozdział czwarty przedstawia aspekty ekstrakcji zespolonej przenikalności warstw dielektrycznych o niskiej stratności przy użyciu wnęki Fabry'ego-Pérota w paśmie terahercowym. W rozdziale 5 opisane zostały procedury projektowe, konfiguracje pomiarowe oraz algorytmy stosowane do obu zaproponowanych przez Autora wnęk Fabry'ego-Pérota. W rozdziale szóstym Autor przedstawia uzyskane wyniki eksperymentalne dla obu układów. Ponadto w przypadku układu do pomiaru materiałów dielektrycznych przedstawiona została zaproponowana przez Autora metoda sprzężenia wolnej przestrzeni z wnęką. Rozprawa zawiera również pięć dodatków, w których Autor opisał referencyjną metodę pomiarową dla pomiarów przewodności (Dodatek A), sposoby sprzężenia wnęki rezonatora Fabry'ego-Pérota z wiązką terahercową (Dodatki B i C), pomiar mikropaskowego rezonatora pierścieniowego (Dodatek D) oraz pomiary zespolonej przenikalności elektrycznej wybranych laminatów pokrytych miedzią (Dodatek E).

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

Bibliografia rozprawy składa się ze 142 pozycji literaturowych, z czego Doktorant jest współautorem sześciu pozycji. Autor powołuje się zarówno na starsze prace z tematyki poruszanej w pracy jak i na najnowsze pozycje literaturowe, zarówno książkowe jak i artykuły konferencyjne, czy w czasopismach branżowych. Dobór literatury, jak i przedstawiony przegląd

rozwiązań świadczy o dobrym rozpoznaniu tematyki przez Autora i dowodzi o jego dostatecznej wiedzy w tym zakresie. Przegląd literaturowy jest jasny i przejrzysty a dobór źródeł prawidłowy.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Celem rozprawy była charakteryzacja materiałów przewodzących i dielektrycznych w paśmie fal milimetrowych i fal terahercowych. Autor po zapoznaniu się z istniejącymi układami pomiarowymi i przeanalizowaniu ich wad oraz ograniczeń zaproponował własne rozwiązanie wykorzystujące otwarty rezonator Fabry’ego-Pèrota. W celu analizy projektowanych układów Doktorant użył hybrydowej metody opartej na macierzy rozproszenia. W metodzie tej układ rezonatora podzielony został na sekcje opisane poprzez wielorodzajową macierz S wyznaczoną przy użyciu metod analitycznych bądź dyskretnych. Przewaga przyjętego rozwiązania opiera się na wysokim współczynniku dobroci rezonatora. Uwzględnienie źródeł obniżenia współczynnika dobroci pozwoliło Autorowi na określenie niepewności pomiarowej metod. Przyjęte założenia umożliwiły konstrukcję układów pomiarowych o wysokiej czułości, pozwalające na uzyskanie wyników z wysoką powtarzalnością i niskim odchyleniu.

Autor zastosował właściwe metody badawcze, dobierając odpowiednie metody analizy, symulacji elektromagnetycznej i pomiaru układów wysokich częstotliwości. Przedstawione wyniki teoretyczne jak i pomiarowe dowodzą prawidłowości wykonanych obliczeń i użytych metod pomiarowych. W związku z powyższym przyjęte w pracy założenia są uzasadnione i poprawne.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Rozprawa doktorska mgr. inż. Jerzego Cupera jest rozprawą oryginalną. Do oryginalnych osiągnięć Autora zaliczyć można przede wszystkim:

- Opracowanie nowej metody pomiaru przewodności w paśmie fal milimetrowych;
- Opracowanie nowej metody pomiaru zespolonej przenikalności elektrycznej w paśmie fal terahercowych;
- Opracowanie metody sprzężenia wolnej przestrzeni z wnęką rezonatora Fabry’ego-Pèrota;

Należy zwrócić uwagę, że część wyników przedstawionych przez Doktoranta w rozprawie została również opublikowana w formie dwóch publikacji w naukowych czasopismach branżowych *Measurement* [48] i *Applied Physics Letters* [13] oraz w postaci czterech komunikatów

konferencyjnych [47,49-51] zaprezentowanych na międzynarodowych konferencjach naukowych, których Doktorant był współautorem, a w przypadku trzech publikacji pierwszym autorem. W publikacji [47] zawarto wyniki pomiaru przewodności z zakresu od 10^4 do 10^7 S/m w zakresie częstotliwości od 20 do 40 GHz przy użyciu płasko-wklęsłego rezonatora Fabry’ego-Perota. Publikacja [48] stanowi rozwinięcie publikacji [47] i zawiera wyniki pomiaru przewodności znacznie większej liczby materiałów w zakresie od 10 do 40 GHz. Ponadto opisano w niej modyfikację układu pomiarowego w zakresie zmiany kształtu lustra, pokrycia go warstwą srebra oraz zastosowania dokładniejszych szacunków współczynnika dobroci co pozwoliło na pomiar materiałów niższej przewodności od 10^3 S/m. W komunikacie [49] opisano uwzględnienie dodatkowych źródeł strat jak straty objętościowe powietrza oraz wpływu otworów sprzęgających co pozwoliło na rozszerzenie zakresu pomiarowego układu z publikacji [48] do 70 GHz. Publikacja [13] dotyczyła pomiaru zespolonej przenikalności elektrycznej materiałów dielektrycznych w zakresie od 20 do 110 GHz. Komunikat [50] dotyczył pomiaru przewodności folii miedzianej w zakresie 13-40 GHz a komunikat [51] poświęcony był pomiarom przewodności laminatów pokrytych miedzią w zakresie do 2 GHz.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Rozprawa doktorska zawiera streszczenie, wprowadzenie, pięć rozdziałów, zakończenie, bibliografię, spis rysunków oraz pięć dodatków. Praca napisana jest w języku angielskim w sposób jasny i przejrzysty i ma objętość 148 stron. Układ pracy, jak i kolejność oraz kompletność poszczególnych rozdziałów są dostosowane do poruszanej tematyki i zakresu badań. Autor w zwięzły sposób opisuje badany problem i komentuje otrzymane wyniki. W pracy występują liczne drobne błędy redakcyjne i literowe (więcej w punkcie 6 niniejszej recenzji), jednakże nie umniejszają one wartości merytorycznej pracy.

6. Jakie są słabe strony i główne wady rozprawy?

Praca nie zawiera istotnych wad, które mogłyby obniżyć jej wartość. W teksie znajdują się jednakże liczne błędy literowe, językowe czy edytorskie, które wymieniam poniżej:

- brak odstępu między wyrazami: strona 23 "...characterized.In..."; strona 25 "...structure-which...", "...timesinto..."; strona 93 "...methodsTHz...", "...FPORwas..."; strona 96 "...foil-sCOP..."; strona 104 "...polarizationthe..."; strona 107 "...supportswwhich...", "...setupto...";
- Pozostałe fragmenty tekstu z prawdopodobnie wcześniejszej wersji rozprawy: strona 18 "In the last two appendices two alternative methods of coupling of FPOR cavity with terahertz

- beam are presented."; strona 30 "pronounced above microwave band. However for very rough interfaces (features of a few micrometers size) ."; strona 60 "Consequently, its influence is less than 1% and can be disregarded under standard laboratory conditions.";
- błędy edytorskie i literowe: strona 39 "...sumple...", "...Thz..."; strona 41 "...i later..."; strona 51 "he resulting..."; strona 55 "...for he dielectric..."; strona 67 "...measurement og of complex..."; strona 94 "... $\delta \tan \delta$..."; strona 95 "... presented in figure 6.38 and 6.38..."; strona 114 "... α_2 visible in figure B.5a).";
 - błędy językowe: strona 51 "...it have to..."; niewłaściwe użycie słowa "site" zamiast "side" w tekście i na rysunkach w rozdziale 6;
 - brak w konsekwencji stosowania notacji zapisu symbolu całki: przykładowo we wzorze (3.3) całka po objętości oraz po powierzchni zapisana jest przy użyciu symbolu całki wielokrotnej natomiast we wzorze (3.4) przy użyciu całki pojedynczej;
 - brak opisu osi na rysunku 3.1;
 - błędne odwołanie do wzoru na stronie 44: "...equation 3.7..." zamiast (3.6);
 - błędne podanie wymiarów: strona 131 "...thicknesses of $0.256\mu m$ and $0.135\mu m$ ";
 - błędne sformatowanie pozycji bibliograficznej: [40], [41], [57], [60], [61], [65], [69], [98], [99], [101], [102], [103], [116], [117], [124], [129] i [137].

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?

Praca ma charakter praktyczny i jej cel ma być odpowiedzią na aktualne zapotrzebowanie rynkowe związane z branżą telekomunikacyjną. Rosnące możliwości oferowane przez sieci telekomunikacyjne generują powstawanie nowych jej aplikacji, które wymuszają dołączenie do nich coraz większej liczby urządzeń. W celu zapewnienia odpowiedniej pojemności sieci, a dodatkowo oferując szybsze transfery danych przy minimalnych opóźnieniach, potrzebna jest nie tylko rozbudowa sieci szkieletowej i radiowej sieci szkieletowej ale użycie nowych, wyższych pasm częstotliwości. Recenzowana praca ma na celu charakteryzację materiałów przy wysokich częstotliwościach, a tym samym tematyka poruszana w rozprawie jest aktualna i ważna.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- ☐ niespełniająca wymagań,
- ☐ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- ☐ **spełnia wymagania,**
- ☐ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,
- ☐ wybitnie dobra zasługująca na wyróżnienie.

W mojej opinii recenzowana rozprawa opisuje samodzielne rozwiązanie problemu badawczego i stanowi oryginalny wkład w rozwój dziedziny elektronika. Treść i poziom merytoryczny pracy świadczy o zadowalającym poziomie wiedzy Autora w tej dziedzinie. Mgr inż. Jerzy Cuper rozwiązał postawiony cel naukowy i tym samym wykazał się wiedzą i umiejętnościami wymaganymi dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez odpowiednią ustawę o stopniach i tytule naukowym. Jednocześnie wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jerzego Cupera do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej.

Rafał Lech

dr hab. inż. Rafał Lech, prof. PG