

płk dr hab. inż. Norbert Pałka, prof. WAT
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. S. Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Jerzego Wiktora CUPERA

pt. „Accurate Methods of Characterization of Conductive Layers and Dielectric Samples at Millimeter-Wave and THz Frequencies”

(“Dokładne metody charakteryzacji warstw przewodzących i próbek dielektrycznych w zakresie fal milimetrowych i THz” – tłumaczenie własne recenzenta)

przygotowanej pod opieką naukową promotora dr hab. inż. Pawła Kopyta.

1. Uwagi wstępne

Podstawą opracowanej recenzji jest Informacja o powołaniu do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia naukowego doktora na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej nr 846/II/2024 z dnia 19.11.2024. Rozprawa została dostarczona jako monografia w języku angielskim. Zgodnie z wytycznymi, recenzja została przygotowana w języku polskim.

Podstawą recenzji są:

- A. Ustawowe wymagania¹ stawiane rozprawie doktorskiej, która „(...) prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (...)”. „Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne”. Ponadto, „Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej”.
- B. Informacje i zalecenia dla recenzentów rozpraw doktorskich dla Rady Dyscypliny Automatyka, Elektroniki, Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej.

¹ Art. 187, Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami.

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

Niniejsza rozprawa koncentruje się na opracowaniu nowych zastosowań wnęk Fabry-Pérota (F-P) jako narzędzia do charakteryzacji materiałów o niskich stratach, w tym przewodności metali w paśmie fal milimetrowych oraz zespolonej przewodności elektrycznej dielektryków w paśmie fal terahercowych. We wprowadzeniu Doktorant przedstawił dwa cele swojej rozprawy, a mianowicie:

Cel 1. Opracowanie metody opartej na rezonatorze Fabry-Pérota do pomiaru przewodnictwa w paśmie fal milimetrowych.

Cel 2. Opracowanie metody opartej na rezonatorze Fabry-Pérota do pomiaru zespolonej przenikalności elektrycznej w paśmie THz.

Szczegółowa analiza rozprawy mgr. inż. Jerzego Cupera upoważnia do stwierdzenia, że powyższe **cele zostały sformułowane poprawnie i jasno** określają kierunki badań oraz zakres pracy. Oprócz powyższych celów, doktorant sformułował (choć nie *explicite*) dwa uszczegółowiające wymagania dla powyższych celów:

1. Metody charakteryzowania materiałów o niskiej stratności muszą być dokładne, powtarzalne i niezawodne.
2. Metody te powinny umożliwiać użytkownikom uzyskiwanie wielu punktów pomiarowych bez konieczności opracowywania wielu konfiguracji.

Powyższe cele wraz z wymaganiami stawiają przed badaczem-konstrukтором bardzo konkretną i wysoko umiejscowioną poprzeczkę. W Rozprawie nie występuje teza, ale nie jest to wymóg pracy doktorskiej.

3. Czy w Rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle.

Bibliografia zawiera 142 odniesienia wyłącznie do anglojęzycznych artykułów, książek, doniesień konferencyjnych i stron internetowych, w tym 7 pozycji ze współautorskim udziałem Doktoranta. Stwierdzam, iż **w Rozprawie w sposób właściwy przedstawiono analizę źródeł**, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle m.in. z zakresu metod transmisyjno-odbiciowych i rezonansowych, używanych do charakteryzacji materiałów przewodzących i dielektrycznych dla potrzeb układów 5G/6G.

4. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienie, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione.

Autor prowadził swoją pracę przy zastosowaniu metod teoretycznych, symulacji i badań eksperymentalnych. W mojej ocenie **Doktorant poprawnie rozwiązał postawione zagadnienie** i osiągnął cele Rozprawy. Uważam, że zastosowane metody bazujące na otwartym rezonatorze Fabry-Pérota są właściwe do dokładnego, powtarzalnego i niezawodnego wyznaczania zarówno przewodnictwa w paśmie fal milimetrowych jak i zespolonej przenikalności elektrycznej w paśmie THz dla wielu spektralnych punktów pomiarowych. Doktorant wykazał się zarówno gruntowną znajomością podstaw teoretycznych, jak i wysokim poziomem kompetencji inżynierskich w zakresie projektowania i realizacji badań

eksperymentalnych, co znalazło odzwierciedlenie w skutecznej implementacji zaproponowanych metod i przyjęciu uzasadnionych założeń.

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

Oryginalność rozprawy w odniesieniu do pierwszego celu polega na zastosowaniu unikalnej konfiguracji płasko-wklęsłej wnęki rezonatora F-P o wysokiej przewodności materiału zwierciadeł, zaproponowaniu metody justowania położenia zwierciadła płaskiego w celu utrzymania wysokiego poziomu dobroci (rzędu 100.000) i czułości układu oraz zastosowaniu metody wyznaczania przewodności bazującej na symulacjach macierzy rozpraszania. Pozwoliło to osiągnąć wysoką dokładność i powtarzalność pomiaru przewodności, co zweryfikowano dla różnych typów próbek materiałów przemysłowych.

Oryginalność rozprawy w odniesieniu do drugiego celu polega na zastosowaniu do pracy w zakresie 500 GHz wklęsło-wklęsłego rezonatora F-P ze sprzężeniem promieniowania THz opartego na stożkowych tylnych powierzchniach luster, otworach sprzęgających i prętach dielektrycznych działających jak falowód. Nowatorska jest także procedura poszukiwania optimum położenia próbki wewnątrz rezonatora oraz algorytm wyznaczania zespolonej przenikalności elektrycznej, który dowiódł swojej skuteczności dla szczególnie wymagających cienkich próbek o niskiej stratności.

Samodzielny i oryginalny dorobek Doktoranta stanowią także liczne wyniki pomiarów zmierzone na zaproponowanych układach pomiarowych F-P, analiza niepewności pomiaru obu metod, analiza źródeł spadku dobroci, w tym wpływ mechanizmu sprzężenia i tłumienia związanego z atmosferą. Podsumowując, opisane wyniki są oryginalne i znaczące w skali światowej.

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

Zawarte w dysertacji omówienie badań przeprowadzonych przez Doktoranta jest moim zdaniem wyczerpujące, w tym sensie, że pozwala na ich ocenę przez recenzenta. Nadesłana do recenzji rozprawa doktorska składa się w zasadniczej części z wprowadzenia, pięciu rozdziałów oraz podsumowania wraz z omówieniem uzyskanych wyników, co zostało zawarte na 99 stronach. Następnie znajduje się pięć załączników A-E na 35 stronach. W dalszej części pracy znajduje się obejmująca 142 pozycje bibliografia odnosząca się wyłącznie do anglojęzycznych artykułów, książek, doniesień konferencyjnych i stron internetowych. Całość rozprawy składająca się z części merytorycznej, załączników i bibliografii jest zawarta na 148 stronach. W mojej ocenie, **struktura pracy jest poprawna i zgodna z celami pracy.**

Rozprawa jest napisana w języku angielskim w sposób zwięzły, jasny i poprawny pod względem redakcyjnym, dzięki czemu czyta się ją z łatwością. Wyniki pomiarów są przedstawione w przekonujący sposób na czytelnych wykresach w rozdziale 6 wraz ze słupkami błędów.

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

Od około 30 lat obserwujemy znaczny wzrost zainteresowania promieniowaniem z zakresu fal milimetrowych i terahercowych (0,03–10 THz). Ten trend jest związany z szeregiem ciekawych własności i unikalnych zastosowań m.in. w bezpieczeństwie, badaniach nieniszczących materiałów i obrazowaniu, badaniach podstawowych (np. spektroskopia), astronomii oraz szczególnie ostatnio w szerokopasmowej telekomunikacji 5G/6G. Wysoki transfer danych rzędu wielu terabajtów na sekundę wymaga rozwoju nowoczesnej elektroniki ultrawysokich częstotliwości (powyżej 30 GHz). Wydajność takich urządzeń jest warunkowana przez stosowanie materiałów o niskiej stratności i o dobrze znanych parametrach – jest to zespolona przenikalność elektryczna dla dielektryków i przewodność elektryczna dla metali. Wynika stąd potrzeba opracowania i udoskonalania dokładnych, powtarzalnych i niezawodnych metod charakteryzacji materiałów przemysłowych, które mogłyby być stosowane w powyższych aplikacjach. Należy mieć na uwadze, że przewodność rozpatrywanych materiałów (głównie metali) znajduje się w szerokim zakresie 10^3 – 10^7 S/m a tłumienie rozpatrywanych próbek dielektrycznych wyrażone jako tangens kąta strat dielektrycznych – w zakresie 10^{-3} – 10^{-2} .

Wyniki prac związanych z Rozprawą zostały opublikowane w czasopiśmie *Measurement* z IF=5,2 (200 pkt. MNiSW) oraz *Applied Physics Letters* z IF=3,5 (100 pkt. MNiSW) oraz w sześciu materiałach z renomowanych konferencji międzynarodowych, m.in. w IEEE/MTT-S International Microwave Symposium i International Microwave and Radar Conference (MIKON).

Zważywszy na powyższe, w mojej ocenie rozprawa mgr inż. Jerzego Cupera dotycząca opracowania metod charakteryzacji warstw przewodzących i próbek dielektrycznych w zakresie fal milimetrowych i THz **jest właściwa, aktualna i ważna** zarówno dla rozwoju nauk inżyneryjno-technicznych w zakresie technologii 5G/6G jak i fal milimetrowych i terahercowych.

8. Uwagi krytyczne

Nie dostrzegam w pracy istotnych usterek merytorycznych, a z recenzenckiego obowiązku wskazuję tylko drobne uwagi krytyczne:

- 1) Nie mogę w pełni zgodzić się następującym dość kategorycznym stwierdzeniem z rozdziału 1.1: „Methods for characterizing low-loss materials must be accurate, repeatable, and reliable to achieve this goal. Furthermore, these methods should allow users to obtain multiple measurement points without the need for multiple setups. **There are no methods for the measurement of metals and dielectrics in mm-wave and THz band that simultaneously fulfill all those requirements.**” W zakresie THz do wyznaczenia zespolonej przenikalności elektrycznej standardowo wykorzystywana jest metoda *Time Domain Spectroscopy*, która posiada szereg zalet i wiele skutecznych zastosowań. Oczywiście, w pewnych dość specyficznych aplikacjach, zaproponowana metoda F-P może być bardziej dokładna i prostsza w użyciu.
- 2) Czytając rozdział 2 trudno jest zrozumieć, skąd się bierze fala w rezonatorze. Autor zakłada, że ona tam po prostu jest i propaguje się jako fala Gaussowska - mod TEM₀₀.

- 3) Niektóre rysunki są przedstawione w sposób zbyt uproszczony i trzeba się domyślać, jak propaguje się fala np. w wnętrzu rezonatora na rys. 2.3 lub jak jest wprowadzane i wyprowadzane promieniowanie do i z wnętrza rezonatora (rys. 2.4-2.6).
- 4) Układ pomiarowy dla wyznaczania zespolonej przenikalności elektrycznej dielektryków został przedstawiony na kilku rysunkach i fotografiach w rozdziale 5.2, na podstawie których trzeba stworzyć jego całościowy obraz. Pewnych informacji trzeba się niestety domyślać.
- 5) W tabelach w rozdziale 6.2 tangens kąta strat został przedstawiony omyłkowo jako wielkość w [S/m].
- 6) W rozdziale 6.2 metoda TDS była stosowana jako referencja dla opracowanej metody z FPOR. Mój pewien niedosyt budzi dość szczątkowy opis działania zastosowanego spektrometru TDS.
- 7) Na rys. 6.35 i 6.36 tangens kąta strat dla metody TDS jest ujemny. Czy Autor ma jakiś podejrzenia, jakie mogą być tego przyczyny?

Poproszę Doktoranta o ustosunkowanie się do uwag nr 1, 2, 6, 7 w formie kilku slajdów przedstawionych w czasie obrony. Jednakże podkreślam, że wymienione uwagi krytyczne nie umniejszają mojej wysokiej oceny Rozprawy.

9. Konkluzja końcowa

W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Jerzego Cupera pt. „*Accurate Methods of Characterization of Conductive Layers and Dielectric Samples at Millimeter-Wave and THz Frequencies*” spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim w stopniu bardzo dobrym, a mianowicie (i) prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, (ii) prezentuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, (iii) stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz (iv) ma właściwą formę monografii naukowej.

W związku z powyższym zaliczam Rozprawę do kategorii „spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem” i wnioskuję o dopuszczenie pana Jerzego Cupera do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Norbert Patka

