

Warszawa, 28.12 2025 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

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Surmy

**pt. „Miniaturyzacja terahercowych odbiciowych układów skanujących z
wykorzystaniem optycznych struktur dyfrakcyjnych”**

1. Wprowadzenie i przedmiot recenzji

Recenzja niniejszej rozprawy doktorskiej została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej dr hab. inż. Jerzego Antonowicza, prof. PW. Promotorem pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Surmy jest dr hab. inż. Agnieszka Siemion, profesor PW. Praca dotyczy badania oraz poprawy właściwości układów stosowanych w detekcji promieniowania terahercowego i ma charakter doświadczalny. Układy detekcji promieniowania terahercowego oraz sposobów kształtowania wiązki wymagają zazwyczaj skomplikowanych oraz kosztownych komponentów i z reguły posiadają dość duże gabaryty. Dążenie do zmniejszenia wymiarów takich układów oraz poprawy ich właściwości pomiarowych i aplikacyjnych jest, zdaniem recenzenta, istotnym zagadnieniem badawczym prowadzącym do poprawy jakości i funkcjonalności różnych urządzeń wykorzystujących techniki terahercowe.

Ogólnie można powiedzieć, że obecnie technologie terahercowe tj. źródła promieniowania, detektory, układy prowadzenia wiązki, itp. wykazują bardzo szybkie tempo rozwoju. Promieniowanie terahercowe posiada wiele zalet w stosunku do innych zakresów promieniowania ze względu na niezbyt dużą energię. Urządzenia wykorzystujące to promieniowanie stosowane są w wielu dziedzinach np. badaniach nieniszczących materiałów, w tym szczególnie materiałów biologicznych, wykrywaniu materiałów niebezpiecznych, w telekomunikacji i teledetekcji w kosmosie i itp. Ważność zagadnienia badawczego podjętego

przez Doktoranta jest widoczna między innymi w postaci licznych publikacji oraz wielu referatów i posterów z jakimi się spotykam na wielu międzynarodowych konferencjach dotyczących techniki terahercowej. Zastosowań promieniowania terahercowego szybko przybywa. Również istniejące urządzenia np. spektrometry TDS, bramki skanery THz i inne wymagają doskonalenia ich parametrów użytkowych.

2. Zakres pracy i ocena merytoryczna

Praca Doktoranta skupia się na optyce terahercowej, a szczególnie na formowaniu wiązki w zaprojektowanym torze optycznym w wersji odbiciowej. Teza rozprawy doktorskiej jest sformułowana następująco: „Możliwe jest zbudowanie układu skanującego dla zakresu promieniowania terahercowego w konfiguracji odbiciowej z użyciem struktur dyfrakcyjnych”. Teza jest postawiona poprawnie, co nie jest często spotykane w pracach doktorskich o profilu fizycznym i technicznym. Głównym celem rozprawy było opracowanie demonstratora układu pomiarowego wykorzystującego elementy dyfrakcyjne. Należy zaznaczyć, że Doktorant skupił się na układach optycznych dla promieniowania terahercowego o stosunkowo krótkiej odległości między elementami optycznymi a mierzoną próbką, co jest dość trudnym wyzwaniem. Skanujący układ badawczy zrealizowany został w dwóch konfiguracjach. Zaproponowane przez Doktoranta rozwiązania polegały na wykorzystaniu struktur dyfrakcyjnych do formowania wiązki promieniowania terahercowego w zaprojektowanym torze optycznym i optymalizacji parametrów całego układu optycznego w wersji odbiciowej dla zakresu subterahercowego.

Badania, które podjął Doktorant, mają walor poznawczy, a także mogą stanowić podstawę do rozwiązań praktycznych przy konstruowaniu urządzeń wykorzystujących promieniowanie terahercowe do różnych zastosowań.

Praca jest bardzo zwięzła, wręcz kompaktowa. Układ rozprawy jest klasyczny i łatwy do analizy. Rozprawa liczy 103 strony, zawiera 28 często wielopanelowych rysunków, wykresów i fotografii, 10 tabel i cytowanych jest 112 pozycji bibliograficznych. Rozprawa napisana jest poprawnym technicznym językiem i została podzielona na 8 rozdziałów. Zawiera także spis treści oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

Praca rozpoczyna się wstępem (rozdz. 1), w którym Doktorant określa obszar wiedzy, w którym umiejscowiona została niniejsza praca. Wskazuje też na motywację co skłoniło go do podjęcia wskazanego zagadnienia badawczego.

W rozdziale drugim Autor przedstawia tezę rozprawy, cel oraz zakres badań. Określone zostały również założenia i uwarunkowania które ograniczają zakres pracy.

Rozdział trzeci omawia krótko podstawy teoretyczne związane z realizowaną tematyką badawczą. Opisane zostały struktury dyfrakcyjne, sposoby ich projektowania oraz dobór materiałów na elementy optyczne dla zakresu terahercowego. Następnie opisana została podstawowa metoda wyznaczania parametrów optycznych materiałów w zakresie terahercowym, jaką jest terahercowa spektroskopia w dziedzinie czasu (TDS). Omówiona została również specyfika badań próbek nowotworowych i fantomów z wykorzystaniem promieniowania terahercowego.

Rozdział czwarty jest najbardziej obszerny i opisuje metodykę projektowania oraz wytworzenia struktur dyfrakcyjnych. Wyjaśnione to zostały zasady projektowania konkretnych struktur, dobór materiałów na struktury oraz metody druku 3D.

W rozdziale piątym Doktorant rozważa zagadnienia dotyczące stosowanych metod badawczych i charakterystyki wykonanych w pracy elementów optycznych. Omówiona została szczegółowo metoda charakterystyki struktur segmentowych.

Rozdział siódmy zawiera opis i parametry zaprojektowanego przez Doktoranta demonstratora oraz uzyskane z jego wykorzystaniem wyniki pomiarów.

Podsumowanie uzyskanych rezultatów oraz wnioski zostały przedstawione w rozdziale ósmym. Zdaniem recenzenta w podsumowaniu Doktorant opisał wiele szczegółowych zależności jakie zaobserwował w trakcie realizacji pracy. Duża ilość szczegółów technicznych związanych z wykonanymi eksperymentami jest trudna do zweryfikowania, lecz dla chcących np. powtórzyć badania byłaby z pewnością cenna. Doktorant nakreślił również perspektywy dalszych badań.

Literatura dotycząca tematu, zdaniem recenzenta, jest dobrana 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 prowadzenia pracy naukowej oraz realizacji zamierzonych badań. Zjawiska badane i opisane w pracy są dobrze udokumentowane, co może świadczyć, że Doktorant dobrze opanował techniki eksperymentalne i zna fizykę badanych zjawisk.

Mgr inż. Mateusz Surma zaproponował, zaprojektował i wykonał terahercowy kompaktowy demonstrator w konfiguracji odbiciowej wykorzystujący struktury dyfrakcyjne. W podsumowaniu Doktorant napisał, że „Zaprezentowany układ demonstratora pozwala na obrazowanie próbek przez skanowanie. W przeciwieństwie do popularnych w publikacjach

układów spektroskopowych, nie pozwala na zarejestrowanie pełnej informacji o odbitej fali terahercowej tj. amplitudy i fazy”. W związku z powyższym powstaje pytanie, co potencjalnie można by zaproponować aby jednak uzyskać w takich lub podobnych układach informację o amplitudzie i fazie, ponieważ takie informacje są wyjątkowo ważne.

3. Uwagi ogólne i dyskusyjne

Jeszcze raz należy podkreślić, że praca napisana jest poprawnym, technicznym językiem, a jej redakcja jest składna i przejrzysta.

Uwagi jakie sformułowałem dotyczą głównie pewnych usterek i niedookreśleń, które nasunęły się recenzentowi podczas lektury niniejszej rozprawy.

- w pracy występuje wiele skrótów pochodzących od anglojęzycznych nazw poszczególnych wyrażen, np. str. 39, 46, 57, 60. W tekście rozprawy wszystkie te skróty są opisane, lecz przy czytaniu pojawianie się tych skrótów na różnych stronach zmusza czytelnika do powrotu do stron na których zostały objaśnione. Wykaz skrótów używanych w rozprawie umieszczony na początku lub końcu rozprawy znacznie skróciłby i ułatwił analizę tekstu.

- w rozdz. 3.3 na str. 27 dotyczącym badań nowotworów z wykorzystaniem promieniowania terahercowego Doktorant stwierdza, na podstawie danych literaturowych, że „pewne rodzaje tkanek nowotworowych wykazują rosnącą wartość współczynnika absorpcji oraz malejące wartości współczynnika załamania wraz ze wzrostem częstotliwości”. Powstaje pytanie jakie zjawisko fizyczne może być odpowiedzialne za takie parametry i czy jest to zjawisko typowe dla każdego typu nowotworu? Interesującym jest też w jaki sposób określany był współczynnik załamania przy zastosowaniu układu odbiciowego. W skonstruowanym demonstratorze Doktorant badał różne materiały (str. 76 – 80) w tym fantom skóry (rys.7.5). Mimo zamieszczonych danych pomiarowych recenzent nie zanotował wspomnianych wcześniej zależności. Czy były takie obserwowane? Przy prezentowanych danych pomiarowych nie określono temperatur w jakich zostały wykonane pomiary. Recenzent nie znalazł takich danych przy prezentowanych wynikach pomiaru. Prawdopodobnie należy przyjąć, że były to temperatury pokojowe. Podobnie należałoby odnieść się do atmosfery i wilgotności, która prawdopodobnie ma wpływ na wyniki pomiarów. Pytanie czy można oszacować jak duży ten wpływ mógł wystąpić? Poproszę o ustosunkowanie się Doktoranta do tych zagadnień.

- na str. 22 występuje powtórzenie w jednym zdaniu dwukrotnie zostało użyte słowo „krzem”,

- na str. 35 pojawiło się niejasne dla recenzenta sformułowanie cytaty „struktury zbiegały do rozwiązania znacznie szybciej”. Poza tym na tej samej stronie na rys. 4.2, mimo, że jest on poglądowy brak skali. Proszę o komentarz.

- na str. 38 opis rys 4.3 występuje w języku angielskim, co jest zgodne z cytowaną pozycją literatury [101]. Mimo opisu rysunku jest on dla recenzenta niejasny. Proszę o komentarz.

- na str. 43 występuje niezręczne sformułowanie „udało się wyznaczyć najlepsze materiały do wykonania struktur dyfrakcyjnych”. Może lepszy byłoby zapis np. spośród dostępnych obecnie materiałów na podstawie rezultatów pomiarów udało się wytypować następujące materiały: (i tu wymienić).

- na str. 57 w podrozdz. 5.3.2 przedstawiona jest analiza ilościowa parametrów wykonanych w pracy struktur segmentowych, która być może z powodu niewystarczającego zasobu wiedzy recenzenta, jest mało zrozumiała, szczególnie przedstawione na str. 59 (rys.6.6) „wykresy pudełkowe). Proszę o komentarz.

- na str. 82 we wnioskach (podrozdz. 7.3) pojawiło się stwierdzenie, że rozdzielczość demonstratora wynosi 3 do 4 mm i jest ona związana z parametrami układu oraz długością fali. Nasuwa się pytanie w jaki sposób można zwiększyć tę rozdzielczość (oprócz zmniejszenia długości fali), może poprzez zastosowanie bezdyspersyjnych płaskich soczewek metamateriałowych? Poproszę o ewentualny komentarz.

- na str. 84 mgr inż. Mateusz Surma stwierdza, że „możliwe jest zbudowanie układu skanującego dla zakresu promieniowania terahercowego w konfiguracji odbiciowej z użyciem struktur dyfrakcyjnych”, co stanowi udowodnienie tezy postawionej przez Doktoranta. Recenzent podpisuje się pod tym stwierdzeniem.

- na str. 85 – 86 Doktorant kreśli zagadnienia, które mogłyby być przedmiotem dalszych badań. Dotyczą one głównie ogólnie ujmując „modyfikacji struktur segmentowych” układów demonstratora. We wstępie pracy (str. 16) Doktorant wspomniał, że i tu cytaty „Metamateriały, a w szczególności metapowierzchnie, są w ostatnich latach bardzo popularną kategorią elementów pozwalających na kontrolę i formowanie promieniowania z różnych zakresów spektralnych”. Ponieważ recenzent zajmuje się badaniem metamateriałów, stąd pojawia się pytanie jak Doktorant widzi możliwość zastosowania metastruktur w proponowanym demonstratorze?

Dla określenia przydatności zaprojektowanego demonstratora może warto by spróbować porównać dane pomiarowe uzyskane za pomocą demonstratora z rezultatami uzyskanymi innymi metodami np. IR, czy też f4np. fotodynamiką.

Rezultaty przedstawione w pracy pokazują, że metodami zaproponowanymi przez Doktoranta można poprawić jakość pomiarów w zakresie subterahercowym w modzie odbiciowym.

Interpretacja wyników uzyskanych w pracy i wyciąganych na ich podstawie wniosków jest właściwa. Uwag krytycznych w tym zakresie nie mam.

4. Podsumowanie

Uważam, że metody badawcze przyjęte przez Doktoranta są poprawne a jakość uzyskanych wyników jest wartościowa. Większość wyników została zweryfikowana poprzez umieszczenie ich w licznych publikacjach w czasopismach o relatywnie dużym współczynniku wpływu, w tym jeden artykuł w wysoko punktowanym Scientific Reports. Autor wymienia 3 publikacje, które są ściśle związane z tematyką rozprawy. W dwóch artykułach mgr inż. Mateusz Surma jest pierwszym autorem. Doktorant prezentował wyniki swoich prac również na konferencjach międzynarodowych. Poza tym Doktorant jest współautorem 18 różnych prac klasyfikowanych jako artykuły pokonferencyjne. Recenzent traktuje je jako pełnowartościowe publikacje zwłaszcza, że w większości zostały również opublikowane w renomowanych czasopismach o światowym zasięgu. Udział mgr inż. Mateusza Surmy w tych publikacjach świadczy o dużej jego aktywności w zespole badawczym, w którym realizował swoją pracę doktorską. Zgodnie z informacją zawartą w pracy Doktorant brał udział w 5 krajowych projektach badawczych z czego w dwóch był kierownikiem, a w 3 wykonawcą.

Uwagi krytyczne recenzenta są minimalne, a ocena końcowa pracy bardzo pozytywna. Podsumowując uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Surmy, zawiera duży ładunek udokumentowanych nowości naukowych z zakresu doskonalenia technologii terahercowych. Są to badania o znaczeniu poznawczym oraz aplikacyjnym. Należy raz jeszcze podkreślić, że Doktorant podjął się badań bardzo interesujących zagadnień szczególnie pod kątem zastosowań technologii terahercowych analizując je zarówno od strony stymulacji numerycznych oraz dobrze udokumentowanych wyników eksperymentalnych. Są to, w opinii recenzenta, ważne rezultaty dla dalszego rozwoju technik terahercowych.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Surmy spełnia warunki przewidziane ustawą o tytułach i stopniach naukowych. Wnoszę o przyjęcie pracy i dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Wnoszę również o wyróżnienie tej pracy. Powodem takiego wniosku jest głównie kompleksowa analiza badanych zjawisk (symulacje numeryczne i badania

eksperymentalne, zaproponowanie demonstratora) oraz liczący się dorobek publikacyjny. Należy raz jeszcze podkreślić, że znaczna część wyników pracy została opublikowana w renomowanych międzynarodowych czasopismach.



Janusz Parka