Warszawa, 24 listopada 2025r.

Prof. dr hab. inż. Jacek Marczewski
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki
Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa
jacek.marczewski@imif.lukasiewicz.gov.pl

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

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

autor: **mgr inż. Mateusz Surma**

praca wykonana na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej

promotor: dr hab. inż. Agnieszka Siemion, prof. PW

Motywacją prac, których dotyczy Rozprawa, jest opracowanie koncepcji kompaktowego i niezbyt kosztownego systemu pomiarowego do obrazowania tkanek biologicznych przy użyciu promieniowania terahercowego (THz) w kontekście detekcji ich nowotworowych zmian. Taniość i dostępność rozwiązania wyklucza użycie w systemie standardowych układów służących spektroskopii w domenie czasu (TDS). Należy jednak wspomnieć, że istnieją kompaktowe, komercjalne (terahercowe) układy do spektroskopii odbiciowej ATR – metody zaczerpniętej z rozwiązań dla analizy próbek medycznych w podczerwieni (np. Hamamatsu – seria C12068). Nie służą one jednak do obrazowania próbek. Recenzowana praca skupia się na modelowaniu, wykonaniu oraz charakteryzacji elementów dyfrakcyjnych (DOE) użytych w systemie, wyboru jego koncepcji oraz wytworzeniu i weryfikacji działania demonstratora.

Przedstawiona do recenzji praca liczy 103 strony, zaś bibliografia zawiera ponad sto pozycji. Napisana została w języku polskim, zwarto i przejrzyście, a jej układ nie budzi istotnych zastrzeżeń.

Zakres Rozprawy obejmuje wiele różnych zagadnień wymagających:

- biegłej znajomości szczegółowych zagadnień z zakresu optyki dyfrakcyjnej;
- umiejętności wykorzystania zawansowanych metod modelowania przestrzennego;
- dogłębnej znajomości technologii druku 3-D;
- biegłości w charakteryzacji właściwości optycznych wytwarzanych struktur;
- umiejętności prowadzenia różnorodnych eksperymentów w zakresie częstotliwości terahercowych.

Pierwszy rozdział Rozprawy stanowi wstęp, w którym autor skonkretyzował i uzasadnił motywację prowadzenia prac opisanych w Rozprawie.

Drugi rozdział zawiera cel, zakres oraz tezę Rozprawy, jaką jest **sprawdzenie możliwości zbudowania układu skanującego dla zakresu THz w konfiguracji odbiciowej z użyciem DOE**. Rozprawa realizuje cel poboczny, jakim jest wybór pomiędzy koncepcją uzyskania możliwie jednorodnego natężenia promieniowania w płaszczyźnie próbki a koncepcją układu pracującego trybie pozaosiowym.

Trzeci rozdział Rozprawy stanowi opis kluczowego dla zrozumienia pracy wprowadzenia teoretycznego do zagadnień omawianych w pracy z uwzględnieniem kontekstu literaturowego. Autor dokonał omówienia poszczególnych zagadnień w sposób bardzo skrótowy, co wydaje się być mankamentem pracy. Na przykład opis techniki TDS, niezwykle ważnej metody pomiarowej dla określania parametrów materiałowych, został przez Autora maksymalnie uproszczony i wymagałby np. bardziej dogłębnej analizy błędów metody (wykraczającej poza Rys. 3.2). Ciekawym jest także, co Autor miał na myśli pisząc o obrazowaniu w głąb próbki (str. 25). Byłoby to istotnym elementem wzbogacającym pomiary tkanek biologicznych. Zwraca także uwagę, że ilość używanych w Rozprawie kilkuliterowych skrótów (zwłaszcza w dalszej części pracy), jest poważna i jeśli czytelnik przegapił ich pierwsze użycie (gdzie zostały rozwinięte), to pomocą w lekturze byłby dodatkowy ich indeks na początku Rozprawy. W podrozdziale 3.3 zamieszczono rysunek ze zdjęciami zmienionych nowotworowo tkanek i ich obrazy terahercowe po resekcji bez zamieszczenia opisu kolorowych skali, co uniemożliwia ocenę zalet obrazowania THz. W rozdziale 3.3.1 brak jest też referencji odwołującej się do powiązanego z doktoratem projektu (str. 29 na dole strony). Być może był to projekt przywołany na dole strony 86?

Rozdział czwarty, to opis metodyki projektowania i wykonania DOE a także doboru materiałów (ach te skróty – patrz rys. 4.5, aż się prosi o tabelkę z rozwinięciami). Z pożytkiem dla pracy można było cały Rozdział 4 rozszerzyć o szczegóły, co wpłynęłoby pozytywnie na jego przejrzystość. Na przykład rozważania dotyczące spekli są bardzo istotne w kontekście odrzucenia w dalszej części Rozprawy jednej (z dwóch) koncepcji budowy systemu (str. 61). Rozdział ten ma też kilka drobnych błędów edytorskich.

Rozdział piąty, to charakteryzacja struktur segmentowych służąca sprawdzeniu możliwości uzyskania wystarczająco jednorodnego rozkładu promieniowania w płaszczyźnie próbki (koncepcja I systemu pomiarowego). Uwagę Recenzenta zwrócił długi czas skanowania (45 minut), a marzyłyby się pomiary in vivo. Istotny dla pełnego zrozumienia rozdziału rysunek 5.5 jest źle czytelny, przydałyby się większe powiększenia i rozwinięcie stosownego opisu (strony 55 i 57). Recenzent także nie znalazł metodyki pomiaru stosunku sygnał/szum (SNR).

Rozdział szósty opisuje charakteryzację pozaosiowych struktur punktowych. Jest napisano jasno i jego lektura jest zdecydowanie łatwiejsza od rozdziału poprzedniego.

Rozdział siódmy zawiera opis ostatecznego demonstratora poprzedzony konkluzją o wyborze ostatecznej koncepcji sytemu. Demonstrator jest układem pracującym w reżimie odbiciowym z wykorzystaniem wersji pozaosiowych DOE. Autor pokazuje wyniki pomiarów różnorodnych obiektów (w ich liczbie fantomu skóry). Uzyskane obrazy budzą wątpliwości Recenzenta: czy rozdzielczość skanów jest wystarczająca do oceny próbek biologicznych w kontekście wyników histopatologicznych powszechnie stosowanych in vitro. Szacowana rozdzielczość rzędu kilku mm nie wydaje się wystarczająca, choć, jak stwierdza Autor, być może zmniejszenie plamki poprzez zastosowanie krótszej ogniskowej DOE polepszyłby rozdzielczość. Recenzent nie rozumie też dlaczego Autor proponuje w tym celu zwiększenie długości fali (str. 82). Wydawałoby się, że korzystna dla rozdzielczości systemu byłaby fala krótsza.

Rozdział ósmy stanowią wnioski i podsumowanie pracy. Autor stwierdza, że chociaż układ nie pozwala na zarejestrowanie amplitudy i fazy fali odbitej, to oferuje większą szybkość pomiaru. Aż prosi się, aby w tym miejscu podać czasy skanowania dla demonstratora no i jego wymiary w związku z hasłem „miniaturyzacja" w tytule Rozprawy. Oczywistym jest, że oba paramenty będą zapewne korzystniejsze od tych dla urządzeń do pomiarów spektroskopowych, ale te drugie pozwalają na

określenie pełnych optycznych właściwości próbek także w domenie częstotliwości. Przydałoby się ponadto wykonanie pomiaru demonstratorem np. wycinka skóry z fragmentem nowotworu. Następnie, w rozdziale tym, zamieszczona jest lista publikacji własnych i doniesień konferencyjnych z podziałem na te związane blisko z Rozprawą oraz poboczne. Wszystkie publikacje są zbiorowe, ale w tych najściślej związanych z pracą doktorant występuje jako pierwszy autor. Na uwagę zasługuje spora ilość doniesień na renomowanych konferencjach z cyklu IRMMW-THz.

Ostatnią częścią Rozprawy jest bibliografia. Szkoda, że spisu referencji nie uzupełniono o sygnatury DOI.

Wyniki prac pokazanych w Rozprawie zostały częściowo opublikowane w szeroko cytowanych czasopismach. Praca zawiera kilka mało istotnych błędów edytorskich i jest napisana w sposób bardzo konkretny i zrozumiały. Rozprawa dokumentuje osiągnięcie zamierzonych celów i potwierdzenie słuszności tezy Rozprawy.

Stwierdzam, że Rozprawa „Miniaturyzacja terahercowych odbiciowych układów skanujących z wykorzystaniem optycznych struktur dyfrakcyjnych" spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym obowiązującą aktualnie w Polsce i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jacek Marczewski

24/11/2025