



Wojskowa  
Akademia  
Techniczna  
im. Jarosława Dąbrowskiego

Instytut  
Optoelektroniki 

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Bielecki

Warszawa, 23.08.2022 r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ  
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

**Tytuł rozprawy: Optymalizacja połączeń fotodiod HgCdTe z torem wzmacniania  
modułu detekcyjnego promieniowania podczerwonego**

**Autor rozprawy: mgr inż. Mateusz Żbik**

Podstawą do sporządzenia niniejszej recenzji była Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 21 czerwca 2022 r. oraz pismo z dnia 8 lipca 2022 r.

Recenzja została sporządzona zgodnie z zaleceniami przekazanymi przez Politechnikę Warszawską oraz zgodnie z art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm.).

**1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Żbika dotyczy optymalizacji modułów detekcyjnych z detektorami HgCdTe na zakres średniej podczerwieni, produkowanych w firmie VIGO Photonics S.A., pod względem możliwości wykrywania impulsów optycznych o subnanosekundowych czasach trwania.

Aby możliwe było powtarzalne wytwarzanie modułów detekcyjnych o pasmie przenoszenia powyżej 1 GHz, Doktorant opracował schematy zastępcze detektorów i sposób eksperymentalnej identyfikacji tych schematów.

Autor sformułował następujące tezy pracy:

**1. Należy udoskonalić dotychczasową metodę kalibracji głowicy pomiarowej opisanej w pracy [47- której współautorem jest promotor Doktoranta] za pomocą metody samokalibracji, eliminując przyczynę niespójności (związanych z niepowtarzalnością parametrów stosowanych wzorców kalibracyjnych).**

2. „Poszukiwany schemat zastępczy pozwoli dostatecznie dokładnie odwzorować wpływ najważniejszych zjawisk zachodzących w detektorze oraz wewnątrz jego obudowy, jakie są obserwowane w szerokim zakresie częstotliwości”.
3. „Analiza poprawności skonstruowanego schematu zastępczego może być przeprowadzana na drodze symulacji numerycznych (SPICE lub MO) oraz pomiarów w eksperymentalnym systemie nieliniowego VNA, aby móc zmierzyć odpowiedź impulsową rzeczywistego fotodetektora, pobudzanego krótkim impulsem laserowym”.
4. „Typ struktury detekcyjnej opracowanej w [11,31] charakteryzuje się pasmem przenoszenia co najmniej 2 GHz. Natomiast, aby móc osiągnąć podobne pasmo w połączeniu ze wzmacniaczem, należy udoskonalić konstrukcją połączeń drutowych”.
5. „Dzięki wdrożeniu standardowych procedur pomiarowych oraz wsparciu procesu narzędziami CAD, parametry modułów detekcyjnych o szerokim pasmie przenoszenia będzie można dostatecznie dokładnie określić jeszcze na etapie ich projektowania, natomiast sam proces seryjnej produkcji tych urządzeń zostanie przyspieszony”.

Praca doktorska mgr. inż. Mateusza Żbika ma charakter doświadczalny. Składa się ona z wprowadzenia, pięciu rozdziałów, zakończenia, bibliografii oraz ośmiu załączników.

W rozdziale pierwszym, Autor przedstawił obecny stan technologii wytwarzania fotodiod na zakres średniej podczerwieni zwracając szczególną uwagę na te przyrządy, które charakteryzują się dużą szybkością odpowiedzi. Biorąc pod uwagę zjawiska fizyczne zachodzące w ich strukturze, a także wpływ obudowy fotodiody, połączeń drutowych i obciążenia na transmisję sygnału w.cz. opracował On małosygnalowy schemat zastępczy o elementach skupionych.

W rozdziale drugim Doktorant omówił podstawy wektorowej analizy obwodów oraz zasadność falowego opisu sygnałów do charakteryzowania właściwości fotodetektorów LWIR. Przedstawił także znane metody stosowane do kalibracji systemu pomiarowego, umożliwiające korekcję systematycznych błędów pomiarowych oraz wydobycie pożądanej informacji o badanym przyrządzie.

W rozdziale trzecim przedstawiono konstrukcję głowicy pomiarowej do pomiarów fotodetektorów w obudowach TO-8. Autor zaproponował nową metodę do kalibracji głowicy o nazwie SOLR16.

W rozdziale czwartym Autor przedstawił wyniki eksperymentalne z procesu kalibracji głowicy, ocenę ilościową i jakościową, wyniki modelowania detektorów w obudowach TO-8 oraz wyniki weryfikacji eksperymentalnej zaproponowanego modelu małosygnalowego. W podsumowaniu tego rozdziału Doktorant potwierdził, że zostały udowodnione pierwsze trzy tezy rozprawy.

W rozdziale piątym Doktorant opisał modyfikacje opracowanych metod i narzędzi pomiarowych, aby móc je dostosować do warunków produkcyjnych firmy VIGO System S.A. Celem tych prac było zautomatyzowanie procedur pomiarowych i przyspieszenie procesu produkcji zintegrowanych urządzeń detekcyjnych. Omówiono również wdrożenie przemysłowego systemu do charakteryzowania i automatycznej ekstrakcji parametrów fotodetektorów w obudowach TO-8. Autor potwierdził udowodnienie dwóch następnych tez rozprawy.

W dodatkach Autor przedstawił:

- analizę wpływu pojemności pól kontaktowych szafirowej podkładki montażowej,
- opis zasady działania dwuwrotowego wektorowego analizatora obwodów,
- wzorce kalibracyjne TO-8,
- metodę transformacji impedancji odniesienia systemu pomiarowego,

- opis głowicy pomiarowej wg. normy IEEE-370,
- opis projektu wzmacniacza transimpedancyjnego,
- analizę odpowiedzi impulsowej fotodetektorów MWIR i LWIR,
- wielosygnałową odpowiedź impulsową fotodetektora PVI.

Rozprawa liczy 190 stron, w tym 20 stron stanowi literatura, a 30 stron dodatki.

**2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadcząca o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Załączony wykaz cytowanej literatury obejmuje 195 pozycji, w tym pięć prac współautorstwa Doktoranta. Analiza źródeł, zarówno krajowych jak i międzynarodowych, została przeprowadzona z dużą starannością. Dotyczą one detektorów i detekcji promieniowania podczerwonego, pomiaru parametrów detektorów oraz układów elektronicznych w.cz. Przedstawione źródła literaturowe są aktualne i ich lektura świadczy o dostatecznej wiedzy Autora z zakresu merytorycznego rozprawy. Wnioski z przeglądu źródeł literaturowych sformułowano właściwie.

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

Głównym celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest optymalizacja układu połączeń fotodiody HgCdTe na zakres średniej podczerwieni z torem wzmocnienia modułu detekcyjnego za pomocą nowoczesnych programów komputerowego projektowania układów w.cz. Jest ona niezbędna, aby możliwe było szybkie i powtarzalne wytwarzanie serii urządzeń detekcyjnych, charakteryzujących się pasmem przenoszenia powyżej 1 GHz.

Zważywszy na to, że do tak zaawansowanych narzędzi wspomagających projektowanie niezbędne są schematy zastępcze fotodetektorów, zatem przewodnim obszarem zainteresowań Doktoranta były badania dotyczące zagadnień eksperymentalnej identyfikacji takich schematów.

Dla zrealizowania założonego celu pracy i udowodnienia tez Doktorant przeanalizował szereg problemów badawczych dotyczących m.in.:

- opracowania nowej metody kalibracji, za pomocą której można dokładnie określić macierz rozproszenia głowicy pomiarowej, a następnie skutecznie usuwać wpływ systematycznych błędów pomiarowych,
- badań fundamentalnych zjawisk i ograniczeń, jakie wiążą się z detekcją promieniowania w.cz. oraz identyfikacji schematów zastępczych fotodiod,
- opracowania najlepszego sposobu określenia parametrów schematu zastępczego, a następnie wykazania, że prawidłowo reprezentuje fizyczne właściwości fotodiod zarówno w dziedzinie częstotliwości, jak i w dziedzinie czasu.

Znając schemat zastępczy, można ocenić pasmo przenoszenia fotodiod i przeanalizować wpływ połączeń drutowych.

Sformułowanie tez jest logiczne i precyzyjne. Słuszność tez potwierdzają zatem analizy teoretyczne i badania eksperymentalne opisane w rozdziałach 1-5 rozprawy.

Autor rozwiązał postawione zadania, użył właściwych metod badawczych bazując na znanych metodach analizy obwodowej, symulacji i pomiarów układów w.cz. Uzyskane wyniki teoretyczne i eksperymentalne świadczą o poprawności analiz i metod pomiarowych. Podsumowując stwierdzam, że przyjęte założenia są merytorycznie uzasadnione.

**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?**

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć Autora uznaję:

- opracowanie nowej metody kalibracji SOLR16 wektorowego analizatora sieci z dedykowaną głowicą pomiarową. Dzięki niej Autor zrealizował ważne zadanie rozprawy, jakim było zapewnienie jak największej powtarzalności i precyzji pomiarów wykonywanych w zakresie częstotliwości do 6 GHz (uzyskano zatem dużą dokładność wyników pomiarowych w zakresie częstotliwości przewyższającym obecne potrzeby firmy VIGO Photonics S.A.). Są one niezbędne do wyznaczenia macierzy rozproszenia głowicy i impedancji badanego detektora.
- opracowanie małosygnałowego schematu zastępczego fotodiody na elementach skupionych z uwzględnieniem wpływu zjawisk niepożądanych związanych z obudową (tj. strat i opóźnień wprowadzanych przez układ połączeń drutowych) oraz sprzężeń z chłodziarką termoelektryczną. Doktorant wyznaczył wartości pojemności związanych z schematem zastępczym podkładki szafirowej z metalizacją (Dodatek D1). Jednocześnie wykazał, że wpływ wypadkowej pojemności z podkładką szafirową jest znaczący, a zatem obecny sposób montażu fotodiod wymaga poprawy technologii, tzn. zastosowania kleju dielektrycznego oraz zmniejszenia objętości podłoża GaAs na którym wykonuje się strukturę detekcyjną.
- optymalizację układu połączeń fotodiody MWIR z torem wzmocnienia modułu detekcyjnego, określenie wpływu układu połączeń na szybkość odpowiedzi modułu detekcyjnego, a opracowany model wykorzystano do określenia jego pasma przenoszenia.
- zaprojektowanie od podstaw modułu detekcyjnego nowej konstrukcji o pasmie przenoszenia 2,2 GHz. Jest ono znacznie szersze od dotychczas stosowanych w firmie VIGO System.
- wdrożenie opracowanego modułu detekcyjnego w firmie VIGO Photonics S.A.. Może być on stosowany m.in. w szerokopasmowych systemach łączności optycznej w otwartej przestrzeni, a także układach spektroskopowych.
- wdrożenie standaryzowanych metod charakteryzowania i modelowania fotodetektorów oraz przystosowanie ich do warunków produkcyjnych firmy,
- opracowanie zautomatyzowanego stanowiska pomiarowego, dzięki któremu będzie można dokładnie określić właściwości modułów detekcyjnych jeszcze na etapie ich projektowania. Daje to możliwość zwiększenia uzysku produkcyjnego oraz skrócenia czasu potrzebnego na opracowanie modułów detekcyjnych pod konkretne wymagania klientów.

Część uzyskanych przez Autora wyników badań została pozytywnie zweryfikowana przez recenzentów czasopism; *Analytical Chemistry*, *Applied Science*, *Optical Society of America* z tzw. listy filadelfijskiej, materiałów *SPIE* oraz materiałów konferencyjnych (MIKON oraz CLEO).

Przedstawione osiągnięcia są oryginalne, stanowiące samodzielny dorobek Autora i wnoszące nowe elementy do nauki reprezentowanej w literaturze światowej.

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

Recenzowana praca została napisana w sposób przekonujący. Układ pracy jest logicznie uzasadniony. Na szczególną uwagę zasługuje gruntowna analiza źródeł, zarówno krajowych jak i międzynarodowych, podanie metodyki badań i dyskusja otrzymanych wyników.

## 6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Autor nie ustrzegł się dość licznych niedociągnięć edycyjnych i pojęć żargonowych. Wymienię jedynie niektóre zauważone niedociągnięcia merytoryczne.

str. 31 - brak korelacji między wzorami 1.8 i 1.11 (chodzi o oznaczenie współczynnika tłumienia oscylacji w odpowiedzi detektora),  
str. 39 – zdaniem recenzenta pominięcie rozdziału 2 „Podstawy wektorowej analizy obwodów wielkiej częstotliwości” nie uszczupliło by zawartości merytorycznej rozprawy,  
str. 51 – brak korelacji między wzorami 2.29 i 2.30, a rysunkiem 2.4,  
str. 69 – we wzorze 3.18 zamiast  $\det Q_m$  powinno być  $\det Q_r$ ,  
str. 92 – błędne odwołanie do rysunku; zamiast rys. 4.1 powinno być rys. 4.9,  
str. 162 – proszę doprecyzować, czy wartości pojemności podane w tabeli otrzymano na podstawie symulacji?

W ramach dyskusji poproszę Doktoranta o wyjaśnienie nw. problemów:

str. 25 – Autor napisał, że jednym ze skutecznych sposobów ograniczenia pojemności dyfuzyjnej jest spolaryzowanie złącza napięciem wstecznym. Proszę wyjaśnić dlaczego?

str. 30 – podaje Pan schemat zastępczy zespołu fotodetektora i analizuje go pod względem szybkości odpowiedzi. Jednakże projektując tego typu układy należy również zwracać szczególną uwagę na dobór rodzaju przedwzmacniacza i wejściowego elementu aktywnego w tym przedwzmacniaczu. Proszę podać kryterium doboru przedwzmacniacza do danego detektora, aby uzyskać możliwie jak najmniejszy zastępczy poziom szumu układu fotodetektor-przedwzmacniacz.

W punkcie 4.3 został opisany system NVNA, którego schemat przedstawiono na rys. 4.9. Dla przejrzystości pracy należałoby wykazać, dlaczego opracowana przez Autora innowacyjna metodologia charakteryzowania pasma przenoszenia fotodiod jest doskonalsza od metod znanych do tej pory w literaturze fachowej.

Pewien niedosyt budzi mała liczba publikacji Doktoranta. Jest On współautorem sześciu prac dotyczących tematyki rozprawy, w tym trzech publikacji z listy JCR.

Jednakże na obronę należy uwzględnić fakt, iż Doktorant skupił się bardziej na wdrożeniu wyników swoich badań (co opisał w rozdziale 5). Wynika to zapewne z faktu, że praca powstała w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” we współpracy z firmą VIGO Photonics S.A. i Instytutem Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej. Podstawowym założeniem tego programu jest wymóg, aby doktorant był pełnoetatowym pracownikiem przedsiębiorstwa oraz aby wyniki badań zostały wdrożone w przedsiębiorstwie.

## 7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Wyniki badań przedstawione przez Autora rozprawy są wartościowe przede wszystkim z poznawczego punktu widzenia. Praca ma duże znaczenie praktyczne w dobie wytwarzania nowoczesnych detektorów promieniowania optycznego oraz modułów detekcyjnych o szerokim pasmie przenoszenia. Tego typu analizy są niezwykle pomocne dla technologów tych przyrządów.

Na podkreślenie zasługuje współpraca Doktoranta z Zespołami Politechniki Warszawskiej i Politechniki Łódzkiej.

Uważam, że dalsze prace w tej dziedzinie powinny być kontynuowane; wykorzystane do charakteryzowania detektorów i stopni wejściowych fotoodbiorników na inne zakresy widmowe. Wynikami tej pracy powinni zainteresować się badacze zajmujący się technologią detektorów UV, VIS, IR oraz THz.

Podsumowując stwierdzam, że praca ta była możliwa do wykonania w znanej nie tylko w kraju, ale i na świecie firmie VIGO Photonics S.A. we współpracy z Profesorem Wojciechem Wiatrem z Politechniki Warszawskiej.

**8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:**

- a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c) spełniająca wymagania
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Mateusza Żbika spełnia wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm.).

Ponadto stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Mateusza Żbika stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na wysoki poziom wiedzy z dyscypliny automatyka elektronika i elektrotechnika, a także na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata.

