

dr hab. inż. Kamil Staszek, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. S. Staszica w Krakowie
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Instytut Elektroniki
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059, Kraków

Kraków, 22.09.2022

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

pana mgr inż. Mateusza Żbika, pt.
*„Optymalizacja połączeń fotodiod HgCdTe z torem
wzmacniania modułu detekcyjnego promieniowania
podczerwonego”*

opracowana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka,
Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej
z dnia 8.07.2022

1. Wstęp

Pan Mateusz Żbik uzyskał tytuł magistra inżyniera dnia 29 września 2016 roku po obronie pracy zatytułowanej „*Uniwersalny, nanosekundowy sterownik diod laserowych*”, której promotorem był dr hab. inż. Piotr Wieczorek. Kilka miesięcy przed uzyskaniem ww. tytułu pan Mateusz podjął pracę w firmie VIGO Photonics S.A. z siedzibą w Ożarowie Mazowieckim, gdzie pracuje po dzień dzisiejszy, obecnie na stanowisku Microwave Electronics / Optoelectronics Engineer. Jednocześnie pan Mateusz przystąpił do programu Doktorat Wdrożeniowy, którego celem jest uzyskanie stopnia naukowego doktora realizując badania z wyraźnym aspektem wdrożeniowym. Promotorem złożonej rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Wojciech Wiatr z Politechniki Warszawskiej, natomiast funkcję promotora pomocniczego z ramienia VIGO Photonics pełni dr inż. Waldemar Gawron.

W przedłożonej rozprawie doktorskiej Doktorant podejmuje zagadnienie optymalizacji elektrycznych własności modułów detekcyjnych dla zakresu średniej podczerwieni, które produkowane są przez firmę VIGO Photonics. Ich docelowym zastosowaniem są urządzenia spektroskopowe oraz telekomunikacyjne, w których służą do detekcji impulsów o czasie trwania od setek pikosekund do pojedynczych nanosekund. Głównym obszarem badawczym przedstawianym przez Doktoranta skupia się wokół obwodu wejściowego stanowiącego połączenie pomiędzy fotodiodą HgCdTe a przedwzmacniaczem. Jak podaje Doktorant, połączenie to wpływa w sposób znaczący na sposób charakteryzacji fotodiod, bowiem poprzez wprowadzane nieciągłości impedancji, straty oraz dyspersję rejestrowane widmo sygnału podlega liniowym zniekształceniom. Jednocześnie, co zostało wyraźnie opisane w pracy, redukcja tych połączeń podlega ograniczeniom wynikającym m. in. z termicznych warunków pracy fotodetektora. Konieczna jest zatem charakteryzacja i optymalizacja tych połączeń, która stanowi zasadniczą część rozprawy. Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny. Z jednej strony zawiera analizę teoretyczną prowadzącą do opracowania modelu mierzonego układu, a także opracowanie dedykowanej techniki kalibracji, w której brane są pod uwagę fizyczne ograniczenia w realizowalności wzorców kalibracyjnych. Z drugiej strony

przedstawia ona szczegóły dotyczące budowy stanowiska pomiarowego, opracowanego programu do automatyzacji pomiarów, jak i innych szczegółów dotyczących wdrożenia uzyskanych efektów pracy badawczej Doktoranta.

2. Charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim. Składa się ona z pięciu zasadniczych rozdziałów, które poprzedzone są streszczeniem oraz wprowadzeniem i liczy 190 stron. W końcowej części Autor zamieścił zakończenie z ogólnym podsumowaniem, bibliografię, spisy rysunków, tablic i algorytmów, a także osiem dodatków D.1 – D.8, które stanowią bardzo użyteczne dopełnienie treści pracy. Dzięki takiej strukturze pracy czytelnik jest w stanie w przystępny sposób zaznajomić się z głównym tematem pracy. Jednocześnie, we wspomnianych dodatkach wnikliwy czytelnik znajdzie szereg szczegółowych informacji, które mają niebagatelny wpływ na odbiór całości zrealizowanych prac. Dobrym przykładem może tu być dodatek D.3 przedstawiający opis opracowanych przez Doktoranta wzorów kalibracyjnych. Ich sposób wykonania oraz charakterystyka mają znaczący wpływ na uzyskiwane wyniki i zrozumienie fizycznych ograniczeń w omawianym zagadnieniu. Jednocześnie informacje te nie są niezbędne do zrozumienia zasadniczej części pracy, co zdaniem recenzenta uzasadnia trafność przyjętej struktury pracy.

We wprowadzeniu Autor nakreśla kontekst, przybliżając czytelnikowi dziedzinę optoelektroniki z naciskiem na budowę i zastosowanie fotodetektorów. W tej części Autor przedstawia również stan wcześniejszych prac badawczych o podejmowanym obszarze. Istotna część opisu odnosi się do rozwiązań opracowanych przez firmę VIGO Photonics, w której zatrudniony jest Doktorant oraz do projektu INTIR (ang. *INTEgration of InfraRed detectors cooled thermoelectrically or operating in ambient temperature with wideband electronics*) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR), który realizowany był w konsorcjum stworzonym przez Politechnikę Warszawską oraz Politechnikę Łódzką. Odniesienia do podejmowanego obszaru badawczego w kontekście międzynarodowym są wyraźnie rzadsze. W oparciu o przedstawiony stan wiedzy i obecne potrzeby firmy VIGO Doktorant formułuje następujące cele badawcze:

1. Udoskonalenie dotychczasowej metody kalibracji głowicy pomiarowej służącej do charakterystyki fotodiod z wykorzystaniem wektorowego analizatora sieci (VNA),
2. Opracowanie schematu zastępczego fotodetektora, który uwzględniać będzie pasożytniczy wpływ połączeń między fotodiody a przedwzmacniaczem,
3. Przeprowadzenie analizy poprawności skonstruowanego schematu zastępczego na drodze symulacji z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania oraz pomiarów w eksperymentalnym systemie nieliniowego VNA,
4. Weryfikacja pasma przenoszenia struktury detekcyjnej
5. Wdrożenie procedur pomiarowych, które pozwolą na określenie parametrów modułów detekcyjnych o szerokim pasmie przenoszenia jeszcze na etapie ich projektowania, tym samym znacznie przyspieszając proces produkcji seryjnej.

W pierwszym rozdziale Autor scharakteryzował obecny stan technologii wytwarzania fotodiod na zakres średniej podczerwieni. Dalej, na podstawie zjawisk fizycznych zachodzących w złączu fotodiody oraz wpływu obudowy fotodetektora Doktorant sformułował małosygnalowy schemat zastępczy z wykorzystaniem elementów skupionych. Model ten został następnie rozbudowany o układ połączeń z przedwzmacniaczem i chłodziarkę termoelektryczną. W celu uproszczenia analizy Autor stosuje pobudzenie wielorodzajowe, tj. wspólne i różnicowe. Dzięki temu, analizowany układ ulega rozbiciu na dwa mniejsze, których parametry odzwierciedlają parametry elektryczne

wyjściowego schematu. W opinii recenzenta zabieg ten potwierdza dobrą znajomość metod analizy obwodów elektrycznych i umiejętność ich stosowanie.

W drugim rozdziale Doktorant przedstawił podstawy wektorowej analizy obwodów z wykorzystaniem parametrów rozproszenia stanowiących podstawową formę charakterystyki obwodów mikrofalowych. Odniósł się także do macierzy transmisyjnych oraz opisał również podstawy wielorodzajowego opisu dwuwrotników liniowych. W dalszej części rozdziału Autor dokonał przeglądu dostępnych technik kalibracyjnych zwanych również „de-embeddingiem” oraz kalibracji samego analizatora stanowiącego główny instrument pomiarowy. W ich opisie Doktorant skupił się na aspektach takich jak ilość oraz rodzaj wymaganych wzorców kalibracyjnych oraz możliwość uwzględnienia przesłuchów w głowicy, mając jednocześnie na uwadze złożoność i stabilność analizowanych metod.

Kolejny, trzeci rozdział stanowi zasadniczy trzon prac teoretycznych. Doktorant przedstawia w nim opracowaną metodę kalibracji głowicy pomiarowej. Pomimo teoretycznego charakteru rozdziału, Autor umiejętnie dostosował swoją metodę kalibracji (czy też „de-embeddingu”) do ograniczeń wynikających ze specyfiki budowy głowicy. W szczególności uwzględnił on pasożytnicze przesłuchy między liniami sygnałowymi, a jednocześnie skorzystał z ich odwracalności i symetrii, dzięki czemu możliwe było pewne uproszczenie metody. Ponadto, w opracowaniu metody istotną rolę odgrywały ograniczenia w dostępności wzorców kalibracyjnych. W opinii recenzenta Doktorant bardzo trafnie nakreślił ograniczenia występujące w rzeczywistym systemie pomiarowym i poprawnie dostosował do nich procedurę kalibracji.

Rozdział czwarty rozprawy poświęcony jest weryfikacji eksperymentalnej. Polega ona na kalibracji głowicy pomiarowej za pomocą opracowanej metody omówionej w rozdziale trzecim, pomiarze i ekstrakcji wielorodzajowego współczynnika odbicia fotodetektora, a także konfrontacji otrzymanych wyników z opracowanym wcześniej modelem fotodetektora. W celu potwierdzenia poprawności opracowanej techniki Doktorant wykorzystał tu również dodatkowy zestaw obciążeń, których parametry wyznaczone zostały na drodze symulacji elektromagnetycznej. Otrzymane wyniki w pełni korespondują z przewidywaniami, potwierdzając poprawność wykonanej kalibracji i słuszność opracowanego modelu.

Piąty rozdział stanowi zwieńczenie wcześniej zrealizowanych prac teoretycznych i eksperymentalnych, bowiem w nim Autor przedstawia ich modyfikację celem dopasowania do warunków produkcyjnych w firmie VIGO Photonics. Przedstawiony tu został opis adaptacji metody kalibracji oraz ekstrakcji parametrów fotodetektorów, które doprowadziły do znacznego zwiększenia stopnia automatyzacji procedur pomiarowych, co znalazło odzwierciedlenie w przyspieszeniu procesu produkcji. Rozdział ten stanowi wyraźne potwierdzenie wdrożenia wyników prac badawczych, które w firmie VIGO stały się samodzielnym produktem.

W końcowej części rozprawy znajduje się zakończenie zawierające krótkie podsumowanie osiągnięć, wraz z potwierdzeniem zakładanych celów badawczych oraz opis zwięzły opis planowanych dalszych prac badawczych. Dalej znajduje się obszerna, bo licząca 195 pozycji bibliografia. Warto nadmienić, iż Doktorant jest współautorem sześciu wymienionych pozycji. Całość rozprawy kończy osiem dodatków opisanych we wcześniejszej części recenzji.

3. Główne osiągnięcia

Niewątpliwie głównym osiągnięciem Doktoranta jest rozpoznanie i oryginalne rozwiązanie problemu naukowego poprzez opracowanie techniki kalibracji („de-embeddingu”) oraz wykorzystanie jej w celu ekstrakcji parametrów fotodetektorów podczerwieni. Na uwagę zasługuje szczegółowa analiza ograniczeń dotyczących stosowalności wzorców kalibracyjnych oraz umiejętna redukcja modelu kalibracyjnego, która pozwala na zachowanie wysokiej precyzji pomiaru, a także

opracowanie modelu fotodetektora wraz z metodą ekstrakcji jego parametrów obwodowych. Powyższe osiągnięcia zostały potwierdzone eksperymentalnie. Ponadto, należy podkreślić fakt wdrożenia opracowanych metod. Przedstawiona rozprawa zwraca uwagę szerokością podejmowanych zagadnień, poczynając od rozważań teoretycznych dotyczących modelu układu mierzonego i procedury kalibracji, przez pierwotną weryfikację samej kalibracji, aż po weryfikację eksperymentalną modelu fotodetektora i dostosowaniem metody do wdrożenia, co zostało również szczegółowo opisane. Niniejsza rozprawa bardzo dobrze wpisuje się w program „Doktorat Wdrożeniowy”, w ramach którego dysertacja powstała. W tym miejscu należy również wspomnieć o dorobku naukowym Doktoranta, który w opinii recenzenta jest odpowiedni do aktualnego etapu kariery naukowej. Wg wiedzy recenzenta składają się na niego trzy publikacje w czasopiśmie z tzw. listy filadelfijskiej, spośród których w jednym Autor rozprawy jest pierwszym autorem. Ponadto, w dorobku Doktoranta znajduje się sześć publikacji konferencyjnych prezentowanych na międzynarodowych konferencjach. Przedstawiona metoda kalibracji nie stanowi jednak przedmiotu żadnej z powyższych publikacji, co prowadzi do przypuszczeń o szybkim powiększeniu omawianego dorobku naukowego.

4. Słabe strony rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska w opinii recenzenta charakteryzuje się bardzo wysoką jakością merytoryczną. Ponadto jej układ jest przejrzysty i logiczny, a sposób zredagowania profesjonalny. Niemniej jednak recenzent dostrzega kilka uchybień, które przedstawione zostały poniżej:

- a) Na str. 26 w pierwszym przybliżeniu modelu fotodiody przedstawionym na rys. 1.2 Doktorant używa dwóch rezystancji: r_p (rezystancja równolegle dołączona do źródła prądowego I_d oraz r_s (rezystancja szeregową). Podaje on z jednej strony, że rezystancja r_p jest zwykle pomijana, co sugeruje jej wysoką wartość, jednak dalej informuje, że może być ona porównywalna z wartością r_s , której wartość powinna być niska. Nie jest jasne czy Autor odnosi się do porównywalnych wartości rezystancji, czy też do porównywalnego wpływu tych rezystancji na kształt sygnałów.
- b) Na str. 21 Autor pisze: „Jeśli bieguny na płaszczyźnie zmiennej zespolonej s są zespolone i jednocześnie sprzężone, w amplitudowej charakterystyce (1.8) pojawia się wyraźne maksimum na częstotliwości rezonansu własnego (...). W rezultacie odpowiedź skokowa przyjmuje charakter oscylacyjny (...)”. W opinii recenzenta zdanie to jest nieściśle, gdyż tego rodzaju obwody zawsze charakteryzują się transmitancją, w której bieguny są zespolone. Wynika to z rzeczywistych współczynników wielomianu zmiennej zespolonej s , które z kolei są złożeniem wartości elementów. Biorąc pod uwagę dalszą treść Autor zapewne odnosił się do niezerowej części urojonej biegunów transmitancji.
- c) Na str. 68 i 70 Doktorant przedstawia ciekawą technikę rozróżnienia wartości Γ_{dr} i Γ_{cr} w równaniu (3.12) oraz znaku wartości d w równaniu (3.18) na podstawie przesunięcia fazowego przy założeniu, że wzorzec zwarcia i rozwarcia mają stosunkowo niewielkie długości elektryczne. Stąd można je przybliżyć w tym zabiegu do idealnego zwarcia i rozwarcia. Jednak w pracy Autor nieraz podkreśla, że rzeczywiste parametry wspomnianych wzorców są nieco inne, co rodzi pytanie o zakres częstotliwości, w którym stosować można tego rodzaju podejście. Zagadnienie to staje się z pewnością tym bardziej istotne, im wyższa jest rozpatrywana częstotliwość, szczególnie jeśli rozważane pasmo nie zaczyna się od częstotliwości bliskich zeru. Jak pokazano w rozprawie, w stosowanym zakresie częstotliwości metoda ta może być z powodzeniem stosowana, jednak zgrubne określenie maksymalnej częstotliwości byłoby cenną wartością dodaną.

- d) Na rys. 4.1a i 4.1b przedstawione krzywe najprawdopodobniej reprezentują wartości s_{31} i s_{41} , nie zaś s_{12} i s_{34} , jak podaje legenda. Ponadto za pewien mankament pracy zdaniem recenzenta można uznać przedstawianie niektórych wykresów w postaci biegunowej, bez informacji nt. częstotliwości (np. 4.1c i 4.1d). Istotną zaletą jest jednoczesny ogląd modułu i fazy wartości, jednak ich przypisanie do częstotliwości pozostaje kwestią domysłu.
- e) Na rys. 4.3 na str. 79 Doktorant przedstawia wyniki weryfikacji kalibracji z użyciem osobnego zestawu SOLR-WER, które potwierdzają poprawność przeprowadzonej kalibracji. Pewien niedosyt w opinii recenzenta pozostawia jednak fakt, iż mimo, że zestaw weryfikacyjny nie był wykorzystywany w procesie kalibracji, jest on niejako kopia wzorców kalibracyjnych. W konsekwencji obserwacji podlegają jedynie wartości parametrów rozproszenia, które wykorzystane były w kalibracji. Zazwyczaj odbiega się od tego rodzaju podejścia w weryfikacji, dokonując pomiarów innych wartości, niestosowanych w kalibracji. Niemniej jednak tutaj zapewne podyktowane zostało ograniczeniami związanymi z wzorcami kalibracyjnymi i weryfikacyjnymi, co jest odpowiednio skomentowane w pracy.
- f) W rozdziale czwartym Autor prezentuje szereg wyników pomiarów, które potwierdzają słuszność opracowanej metody kalibracji oraz ekstrakcji parametrów fotodetektora. Na przykładzie rys. 4.3 (Str. 79) można stwierdzić, że zmierzone wzorce z zestawu SOLR-WER posiadają parametry bliskie idealnym. Niemniej jednak Autor nie dysponuje pomiarami ich rzeczywistych parametrów, a ich wiedzę opiera na wynikach symulacji. Ponadto, na rys. 4.2 (str. 77) Autor wskazuje, że dla otrzymanych wyników w okolicach częstotliwości 4 GHz warunek pasywności nie jest spełniony. W tym kontekście zdaniem recenzenta należałoby się odnieść do niepewności pomiarowej wykorzystywanego analizatora. W pracy brak jest informacji na temat tejże niepewności, która, choć w nowoczesnym sprzęcie pomiarowym jest niewielka, wprowadza pewien błąd systematyczny. Ten z kolei multiplikuje się przy wielokrotnych przekształceniach matematycznych z wykorzystaniem mierzonych wartości. Jest to tym bardziej istotne, gdy Autor rozważa odchyłki wartości spodziewanych o mniej niż 0,1 dB lub też ułamki stopnia w charakterystykach fazowych.
- g) Na str. 92 i 93 znajdują się nieponumerowane równania, z których to, na str. 93 powinno zostać uzupełnione o pierwiastki kwadratowe impedancji charakterystycznej w mianownikach.
- h) W pracy występują także, choć w niewielkiej ilości błędy językowe, głównie błędy fleksyjne i stylistyczne. Ze względu na ich marginalny wpływ nie zostały przytoczone w recenzji.

W podsumowaniu do powyższych uwag należy dodać, że mają one charakter drugorzędny i nie umniejszają osiągnięć Doktoranta, ani też nie utrudniają odbioru treści pracy.

5. Wniosek końcowy

W świetle powyższych osiągnięć Doktoranta recenzent stwierdza, iż rozprawa doktorska pana mgr inż. Mateusza Żbika zatytułowana „*Optymalizacja połączeń fotodiod HgCdTe z torem wzmacniania modułu detekcyjnego promieniowania podczerwonego*” jest oryginalną pracą badawczą o charakterze teoretyczno-eksperymentalnym zwieńczoną dodatkowo aspektem wdrożeniowym, w której zrealizował zakładane cele badawcze. Spełnia ona wszelkie warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i może zostać dopuszczona do publicznej obrony. Biorąc pod uwagę rozległy charakter rozprawy, w tym jej kompletne wdrożenie a także obecny dorobek naukowy recenzent wnioskuje o wyróżnienie rozprawy.

Wacław Staszek

