

Warszawa, dnia 12 grudnia 2024 r

Dr hab. inż. Ryszard KISIEL, prof. PW
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki
Wydział Elektroniki Techniki Informatycznych, Politechnika Warszawska

**Recenzja rozprawy doktorskiej wykonana dla Rady Dyscypliny Naukowej
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Wrocławskiej na podstawie uchwały nr 26/2/RDN02/2024-2028
z dn. 14 października 2024r**

Tytuł rozprawy:

”Wielokanałowy system pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów do zastosowań w detektorach promieniowania rentgenowskiego”

Autor rozprawy:

Mgr inż. Michał Babij

Promotor rozprawy

Prof.dr hab. inż. Karol Malecha

Recenzowana rozprawa jest poświęcona tematyce gazowych detektorów cząstek elementarnych. Ta grupa detektorów może znaleźć zastosowanie w wielu instalacjach naukowych i przemysłowych, a także w badaniach kosmosu. Rozprawa ma charakter wdrożeniowy. Poszukuje się rozwiązania podatnego na miniaturyzację, o małej masie, przewidzianego do komercjalizacji. W badaniach skupiono się na wykorzystaniu do tego celu miniaturowych gazowych detektorów promieniowania jonizującego opartych o technologię gazowych powielaczy elektronów (*GEM*, ang. *Gas Electron Multiplier*). Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi przewodnik i uzupełnienie informacji zawartych w 6 publikacjach, których współautorem jest doktorant.

Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrywane w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny) ?

Celem badań wdrożeniowych realizowanych w ramach rozprawy było opracowanie konstrukcji i technologii wytwarzania miniaturowego i wielokanałowego systemu pomiaru ładunków (w zakresie femtokulombów jak to formułuje tytuł rozprawy) oraz opracowania zminiaturyzowanych płyt odczytu do zastosowań w detektorach promieniowania rentgenowskiego. Zadanie badawcze postawione jest jasno, a krytyczne elementy do rozwiązania postawionego celu badań są wybrane właściwie.

Potencjalny zakres zastosowań oraz konieczność wykorzystania do realizacji celu zaawansowanych technologii montażu elektronicznego oraz komercyjnie dostępnych układów scalonych wpisuje tę rozprawę w dziedzinę nauk inżynierijno-technicznych, dyscyplina: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

W celu udowodnienia opracowania oryginalnego rozwiązania badawczego doktorant postanowił skupić się na rozwiązaniu wybranych krytycznych elementów detektora GEM:

układu wejściowego do detektora w oparciu o nowatorską technologię z wykorzystaniem ceramiki LTCC oraz płyt odczytu opartych o dwa rozwiązania: ceramikę LTCC oraz klasyczną technologię płytek PCB. Wyzwaniem było podejście, aby rozwiązanie było oparte o wykorzystanie możliwości technologii LTCC oraz o dostępne komercyjne układy scalone. Praca ma duży element aplikacyjny, a jej tematyka jest istotna dla badań wdrożeniowych.

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

Część teoretyczna pracy zawarta jest w rozdziale 2 i częściowo w rozdziale 3 jeśli chodzi o technologię LTCC. Analiza oparta jest o 96 pozycji, w tym 6 pozycji współautorskich doktoranta.

Autor rozprawy przeprowadził dogłębną analizę informacji dostępnych w literaturze światowej oraz na bazie dostępnych źródeł internetowych odnośnie parametrów i dostępności podzespołów w trzech istotnych dla tematyki obszarów badawczych: technologii detektorów GEM, przeglądu elektronicznych układów pomiaru ładunku w zakresie femtokulombów w detektorach GEM oraz struktur zbierających te ładunki. Przeprowadzony przegląd literatury jest aktualny i przygotowany pod kątem poszukiwania rozwiązań podatnych na miniaturyzację oraz wykorzystania dostępnych komercyjnych układów scalonych. Wspomniano, że jako punkt odniesienia do oceny opracowanych w doktoracie rozwiązań stosowane będzie zastrzeżone rozwiązanie oparte o układ scalony APV25 oraz laminat FR4 i folie poliimidowe, rozwiązanie chronione patentem w CERN. Poszczególne obszary analizy opatrzone są podsumowaniem wskazującym na kierunki badań i poszukiwania rozwiązań jakie będą prowadzone w części badawczej. W analizie wskazano, że w momencie rozpoczęcia doktoratu żaden dedykowany układ scalony do detektorów GEM nie był komercyjnie dostępny. Podobnie w zakresie płyt odczytu dostępne na rynku były rozwiązania oparte o podłoża z laminatu FR4 i/lub folie poliimidowe. Dokonany przegląd uzasadniał, że warto podjąć się poszukiwania rozwiązań z wykorzystaniem technologii LTCC. Technologia ta podatna jest na miniaturyzację oraz do zastosowań kosmicznych. Autor rozprawy prawidłowo dokonał doboru źródeł i sformułował właściwe wnioski do badań. Świadczy to o dobrej znajomości tematyki badawczej podjętej w doktoracie.

3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwych metod i czy przyjęte założenia są uzasadnione ?

Doktorant w rozprawie skoncentrował się na rozwiązaniu następujących problemów badawczych:

1. Opracowaniu technologii wykonania wielowarstwowych układów wejściowych detektora zawierających 128 rezystorów o wartości rzędu $30 \text{ M}\Omega$ i 128 rezystorów o

wartości rzędu $0,5 \text{ M}\Omega$ mieszczących się na podłożu z ceramiki LTCC o wymiarach $52 \times 11 \text{ mm}^2$.

2. Skupieniu się w badaniach na znalezieniu rozwiązań elementów detektora GEM podatnych na miniaturyzację.
3. Opracowaniu technologii ceramicznych płyt odczytu detektora podatnych na miniaturyzację, kompatybilnych próżniowo.
4. Zaprojektowaniu i charakteryzacji uproszczonej płyty odczytu na podłożu FR4 co powinno pozwolić na uzyskanie rozwiązania tańszego, ale bez istotnego pogorszenia parametrów użytkowych.

Opis i analiza opisanych powyżej problemów badawczych zawarta jest w rozdziałach nr 3 oraz 4 a podsumowanie badań zawarto w rozdziale nr 5. W rozdziale nr 3 opisany został proces opracowywania miniaturowego układu pomiaru ładunków do detektorów GEM oraz jego integracja w funkcjonalny detektor GEM (zadanie badawcze nr 1). Prace nad detektorem rozpoczęto od określenia założeń projektowych. Założenia oparto o rozeznanie literaturowe, doświadczenie doktoranta oraz kierując się sugestią, aby całość rozwiązania zmieściła się wewnątrz pojedynczego modułu CubeSat 1U. Zaproponowano schemat blokowy, ogólną koncepcję urządzenia oraz wytypowano elementy składowe. Zdecydowano o wykonaniu układów wejściowych z ceramiki LTCC z uwagi na podatność tej technologii na miniaturyzację oraz możliwość otrzymywania rezystorów o dużym zakresie rezystancji. Do realizacji struktur wybrano proces DP951 i kompatybilne z nim materiały. Struktury powinny zawierać rezystory o wartościach rzędu $0,25\text{-}1 \text{ M}\Omega$ i $25\text{-}100 \text{ M}\Omega$. Wielkość ceramicznego układu wejściowego została ustalona na $11 \times 52 \text{ mm}^2$. Pojedyncza struktura ceramiczna powinna zawierać 128 kompletów rezystorów polaryzujących i zabezpieczających, czyli łącznie 256 sztuk na strukturę. Dlatego też rezystory te umieszczono w kilku warstwach. Z uwagi na brak past do współwypalania zaproponowano rozwiązanie oparte o zamienniki. Dla rozwiązania problemów związanych z odgazowaniem past zaproponowano odpowiednią modyfikację procesu wypalania. Napotkane problemy technologiczno- materiałowe rozwiązano w kolejnych iteracjach i finalnie uzyskano tolerancje rezystancji $\pm 20\%$. Opracowane struktury zostały zintegrowane z dedykowanym elektronicznym układem pomiaru ładunków w ramach funkcjonalnego detektora GEM. Wykonano serie pomiarów za pomocą opracowanego urządzenia. Uzyskano bardzo dobre parametry elektryczne, średnia wartość amplitudy szumu dla kompletnego detektora wyniosła $2,47 \text{ fC}$. Opracowany detektor GEM sprawdzono w warunkach operacyjnych, wykonano radiogramy prześwietlanych elementów z metalu i ceramiki. Uzyskano radiogram o dobrej jakości z odwzorowaniem szczegółów. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że opracowane rozwiązanie detektora jest zdolne do detekcji promieniowania rentgenowskiego a także do wykonywania obrazowań z jego użyciem. Możliwe jest także zastosowanie opracowanego rozwiązania do przeprowadzania pomiarów fluorescencji rentgenowskiej, co jest wartością dodaną tych badań.

Rozdział nr 4 dotyczy technologii wytwarzania miniaturowych płyt odczytu. Przetestowano dwie zdecydowanie różne technologie wielowarstwowych układów zbierających ładunki: technologię LTCC oraz klasyczny proces wytwarzania obwodów drukowanych oparty o laminat FR4. Prace nad technologią LTCC realizowane były w ramach projektu MGEM, którego doktorant był współrealizatorem. Jego udział był znaczący (publikacje nr. 91 – 55%,

nr 90 – 40%), a w pracach nad technologią opartą o laminat FR4 jego udział był decydujący (publikacja nr 80 – udział 80%). Wariant technologii LTCC był oparty o pasty przewodzące (Au) oraz dielektryczne, a także z wykorzystaniem grafitowej warstwy poświęcanej. Płyty odczytu PCB miały planarną czterowarstwową konstrukcję. Mogły być wykonywane w klasycznym procesie produkcji przez firmy mające oprzyrządowanie do wiercenia laserowego. Sekwencja badań dla obu technologii była następująca: sformowanie założeń, opracowanie technologii i wykonanie płyt odczytu z ceramiki LTCC przez doktoranta, samodzielne zaprojektowanie płytek FR4 przez doktoranta i ich zamówienie, montaż, weryfikacja oraz wykonanie pomiarów. Oba typy płyt odczytu miały rozmiar $70 \times 70 \text{ mm}^2$, raster płyty LTCC miał wymiar $500 \mu\text{m}$, a płyty z FR4 $545 \mu\text{m}$. Rozkład ładunku między liniami X i Y płyt odczytu LTCC wynosił 54,4% dla X i 45,6 % dla Y, a dla płyt z laminatu FR4 36,9 dla X oraz 63,1 % dla Y. Dla wielu zastosowań ta rozbieżność jest akceptowalna. W analizie wskazano w jaki sposób w kolejnym podejściu można ten rozkład poprawić. Płyty odniesienia PI/FR4 z CERN miały rozkład 56,3% dla osi X i 43,7% dla Y. Dodatkową funkcjonalnością płyt odczytu PCB była możliwość łączenia czterech segmentów w większą macierz.

Opracowana z udziałem doktoranta technologia i wykonane płyty odczytu mają dobre parametry elektryczne i mechaniczne oraz podatność na miniaturyzację co rokuje możliwość ich wykorzystania w detektorach do zastosowań kosmicznych (płyt z ceramiki LTCC) oraz w aplikacjach mniej narażonych (płyty z laminatu FR4). Praca nad płytami odczytu pokazała, że doktorant ma zdolności do koordynacji i prowadzenia prac w zespole badawczym.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową ?

Na podstawie analizy przedstawionego do oceny przewodnika oraz załączonych publikacji współautorskich można stwierdzić istotny wkład doktoranta w opracowanie rozwiązania aplikacyjnego detektora promieniowania rentgenowskiego. Doktorant opracował istotne elementy rozwiązania takie jak opracowanie procesu wytwarzania ceramicznych układów wejściowych detektora składającego się z 128 nekorygowanych rezystorów o wartościach rzędu $25 \text{ M}\Omega$ oraz 128 rezystorów o wartości $0,5 \text{ M}\Omega$ oraz opracowaniu elektronicznego układu pomiarowego w oparciu o rynkowe podzespoły a także opracowanie technologii wykonania dwóch typów płyt odczytu w oparciu o ceramikę LTCC i laminat FR4. Opis technologii wytwarzania ceramicznych układów wejściowych jest kompletny, co ma istotne znaczenie jako, że praca ma charakter wdrożeniowy.

Doktorant pracował w wieloosobowym zespole badawczym zajmującym się tematyką gazowych powielaczy elektronów. Brał czynny udział w ogólnych pracach dotyczących opracowania koncepcji rozwiązania modułowego detektora GEM kompatybilnego z CubeSat, opracowaniu elektronicznego układu przetwarzającego ładunki na wartość cyfrową, miał istotny udział w uruchomieniu kompletnego detektora GEM oraz przeprowadzaniu jego pomiarów. Na jego decydujący merytoryczny wkład w prace zespołu składały się: prace nad opracowaniem i wykonaniem ceramicznych układów wejściowych LTCC, opracowanie konstrukcji detektora GEM dla odczytu LTCC $70 \times 70 \text{ mm}^2$, opracowanie płyty przejściowej umożliwiającej montaż detektora (publikacje współautorskie nr 91, 90 i 32) oraz opracowanie

koncepcji rozwiązania płyt odczytu i technologii dla płyt PCB, samodzielnym zaprojektowaniu płyty odczytu, montażu i uruchomieniu kompletnego detektora z płytami odczytu, a także analizie wyników pomiarów i przygotowaniu dokumentacji (publikacje współautorskie nr 80, 81 i 93).

Opracowane w ramach doktoratu wdrożeniowe rezultaty, w których doktorant ma istotny udział były opublikowane w renomowanych czasopismach zagranicznych.

Według Scopus (21.11.2024), mgr inż. M. Babij jest współautorem 19 publikacji, z czego w 5 jest pierwszym autorem. Prace te były cytowane 138 razy (121 bez autocytowań), a indeks Hirscha $h=8$. Warto podkreślić, że publikacje stanowiące bazę doktoratu były cytowane 12-krotnie.

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

Nie mam zastrzeżeń do redakcyjnej strony rozprawy. Układ pracy jest poprawny, zawiera krótkie streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, wykaz rysunków oraz spis tabel i akronimów. Rysunki w części opisowej mają podane źródła, a w części badawczej są czytelne. Część merytoryczna składa się z rozdziału 1 w którym jasno zdefiniowano cel i zakres pracy uwypuklając tematykę podjętą w ramach doktoratu wdrożeniowego. W rozdziale 2 dokonano przeglądu najpopularniejszych typów gazowych detektorów bazujących na mikrostrukturach. Omówiono budowę i parametry wybranych scalonych przetworników ładunków na wartości cyfrowe oraz przedstawiono materiały i geometrie dwuwymiarowych układów zbierających ładunki. Rozdział 3 stanowi najistotniejszą część rozprawy. Omówiono w nim schemat blokowy, koncepcję urządzenia oraz wytypowano elementy składowe. Element nowatorski to zaprojektowanie i wykonanie ceramicznych układów wejściowych w oparciu o ceramikę LTCC. Problem rozwiązano w sposób oryginalny. Rozdział 4 poświęcono omówieniu dwóch technologii wykonania płyt odczytu, opartej na ceramice LTCC oraz o klasyczny proces wytwarzania PCB. Rozdział zamyka porównanie parametrów osiągniętych przez poszczególne technologie płyt odczytu oraz wnioski odnośnie potencjalnych aplikacji.

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

Oceniana praca ma charakter wdrożeniowy. Dlatego uważam, że podatność na wdrożenie powinno się oceniać nie tylko na podstawie wyników badań ale także według standardów, w tym przypadku chodzi mi o poziom gotowości technologicznej (ang. poziom TRL). W treści rozprawy nie znalazłem takiej informacji. Taka informacja zawarta jest w artykule [poz.81], którego doktorant jest współautorem. Zawarta tam ocena TRL 9 dla detektora opartego o płytki PCB oraz TRL8 dla detektora opartego o ceramikę LTCC, jest moim zdaniem zbyt wysoka. Jest ona oparta o wybrane narażenia operacyjne dla sprzętu opracowanego w skali laboratoryjnej.

Mam też pytanie co do sformułowania z tytułu rozprawy „wielokanałowy system pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów do zastosowań w detektorach promieniowania rentgenowskiego”. Sformułowanie „system pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów” sugeruje opracowanie systemu pomiarów o zakresie „femto”. Opracowany system pomiarowy przetwarza ładunki femtokulombowe w wartości cyfrowe, które umożliwiają sporządzania

radiogramów dokładnie odwzorowujących kształt. W pracy wspomina się, detektory GEM z detekcją pojedynczych fotonów mają możliwość pomiaru wartości ładunku każdego zarejestrowanego zdarzenia, ale dalej tego wątku się nie analizuje.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Gazowe detektory cząstek elementarnych są obecnie jednym z najczęściej stosowanych typów detektorów w eksperymentach z dziedziny fizyki wysokich energii. Urządzenia te po miniaturyzacji mogą mieć zastosowanie w mniejszych instalacjach do pomiarów promieniowania rentgenowskiego czy też w aplikacjach kosmicznych. Ważną cechą detektora GEM z płytą odczytu opartą o technologię płytek drukowanych jest możliwość łączenia kilku segmentów w większą macierz. Do tego celu Doktorant opracował dedykowane obwody drukowane umożliwiające łączenie czterech płyt odczytu.

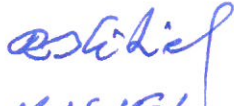
Doktorant pokazał nowe pole zastosowań technologii LTCC. Wykazał, że poprzez modyfikacje procesu wypalania past można „zagrzebać” w strukturze wielowarstwowej rezystory wykonane z past klasycznych o tolerancji +/- 20%.

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~~

Podsumowanie

Doktorant udowodnił, że jest dojrzałym badaczem, potrafi pracować w zespole badawczym i samodzielnie realizować złożone zadania badawczo-wdrożeniowe wykorzystując w sposób świadomy nabytą przez siebie wiedzę, analizując dostępną literaturę, korzystać z dostępnej aparatury badawczej oraz stosować właściwe metody badawcze. Rezultaty badań zostały dobrze udokumentowane i właściwie przeanalizowane. **Stwierdzam, że oceniana rozprawa doktorska spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania ustawowe i zwyczajowo stawiane rozprawom doktorskim (art.190 ust.3 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, tj. Dz.U. z 2023 r poz.742 z późn.zm.). Wnoszę zatem o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony jego pracy doktorskiej.**


RYSZARD KISIEL