

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Bielecki

Warszawa, 15.12.2025r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY NAUKOWEJ DYSCYPLINY NAUKI FIZYCZNE
UNIERSYTETU WARSZAWSKIEGO**

**Tytuł rozprawy: Wysokorozdzielcze jednopikselowe obrazowanie
hiperspektralne w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni**

Autor rozprawy: mgr Rafał Robert Stojka

Promotor rozprawy: dr hab. Rafał Kotyński, prof. ucz.

Opiekun ze strony przemysłowej: dr Michał Kozubał (VIGO Photonics S.A.)

Podstawą do sporządzenia niniejszej recenzji było pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego, dr. hab. Jacka Sczytko, prof. ucz., z dnia 29 października 2025 r.

Recenzja została sporządzona 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. Charakter i kontekst rozprawy

Rozprawa doktorska została wykonana w Szkole Doktorskiej Nauk Ścisłych i Przyrodniczych Uniwersytetu Warszawskiego we współpracy z firmą VIGO Photonics S.A., jednym z wiodących światowych producentów detektorów podczerwieni. Praca ma wyraźny charakter interdyscyplinarny – łączy fizykę, optoelektronikę, technikę detekcji promieniowania optycznego, przetwarzanie sygnałów i obrazów oraz elementy informatyki stosowanej.

Tematyka mieści się w nurcie badań nad nowoczesnymi systemami obrazowania optycznego, które zastępują klasyczne matryce detektorów metodami rekonstrukcji obrazów z wykorzystaniem pojedynczych detektorów.

Wpisuje się w intensywnie rozwijany w ostatnich latach nurt badań nad tzw. obrazowaniem obliczeniowym (ang. *computational imaging*) oraz kompresywnym próbkowaniem (ang. *compressive sensing*), szczególnie w odniesieniu do długości fal niedostępnych dla tanich matryc krzemowych.

Praca doktorska jest przykładem bardzo dobrze zaplanowanego projektu badawczo-rozwojowego, w którym teoria, modelowanie numeryczne, budowa układów eksperymentalnych i testy praktyczne stanowią spójny łańcuch badawczy. Wartość tej pracy wynika zarówno z oryginalności naukowej, jak i z realnego znaczenia aplikacyjnego, co w pełni wpisuje się w oczekiwania stawiane współczesnym doktoratom w dyscyplinie nauki fizyczne.

2. Struktura i zakres merytoryczny

Rozprawa obejmuje łącznie pięć zasadniczych części (z wprowadzeniem i podsumowaniem) oraz ponad 120 stron tekstu, a także liczne rysunki i fotografie. Struktura jest logiczna i przejrzysta.

Rozdział 1 – Wprowadzenie i przegląd literatury

Autor przedstawił obszerny przegląd literatury z zakresu detektorów podczerwieni, techniki LBIC (*Laser Beam Induced Current*), obrazowania kompresyjnego i zastosowań modulatorów z macierzą mikrozwierciadeł DMD (*Digital Micromirror Device*). Widać doskonałą orientację w najnowszych publikacjach – cytowane są prace do roku 2025, w tym z *Nature Communications*, *Optics Express*, *Applied Sciences*, *Sensors*, *Opto-Electronics Review*.

Szczególnie cenne jest zestawienie tradycyjnych metod pomiarowych (FTIR, Raman) z nowoczesnymi koncepcjami opartymi o jednopikselowe obrazowanie, wraz z ich ograniczeniami.

Przegląd stanowi pełnowartościowe wprowadzenie naukowe i dobrze uzasadnia potrzebę podjęcia tematu.

Rozdział 2 – Jednopikselowe obrazowanie skaningowe w zakresie podczerwieni

Wyniki opisane w rozdziale drugim mają charakter pionierski i duże znaczenie praktyczne. Autor opracował układ do obrazowania przestrzennego rozkładu czułości detektorów podczerwieni na potrzeby firmy VIGO Photonics.

Uzyskane mapy wykazały wysoką jednorodność czułości w całym obszarze aktywnym oraz umożliwiły identyfikację lokalnych defektów i obszarów o obniżonej czułości, co potwierdza przydatność opracowanego układu do kontroli jakości detektorów IR.

Opracowany system osiągnął rozdzielczość przestrzenną wynoszącą 50 μm oraz czas akwizycji zaledwie kilka sekund dla obrazu o rozmiarze 10^6 pikseli. Jest to wynik wyróżniający się na tle literatury, zwłaszcza pod względem szybkości pomiaru.

Choć układ nie umożliwia monitorowania procesów epitaksji *in situ*, może być z powodzeniem stosowany do kontroli jakości procesów epitaksjalnych *ex situ*, umożliwiając ocenę jednorodności warstw aktywnych oraz wykrywanie defektów powstałych podczas wzrostu struktur. Ta część pracy stanowi przykład badania wdrożeniowego o wysokiej wartości naukowej i aplikacyjnej.

Wyniki przedstawione w podrozdziale 2.2 dotyczyły opracowania i zastosowania jednopikselowego układu skaningowego w zakresie podczerwieni do mapowania lokalnej czułości widmowej, jednorodności i przesłuchów optycznych detektorów IR. Badania miały charakter wdrożeniowy i były prowadzone w odpowiedzi na potrzeby firmy VIGO Photonics, poszukującej narzędzia do szybkiej, nieniszczącej charakteryzacji detektorów w zakresie 1,5–3 μm .

Autor opracował dedykowany układ optyczno-elektroniczny wykorzystujący skanowanie wiązką lasera i pomiar sygnału z pojedynczego detektora, co umożliwiło odwzorowanie przestrzennej zmienności czułości oraz identyfikację defektów struktury. Zastosowano podejście analogiczne do techniki LBIC, zaadoptowane do zakresu średniej podczerwieni.

Opracowany układ umożliwił uzyskiwanie obrazów o rozdzielczości do 1000×1000 pikseli w czasie 2–5 s, co oznacza skrócenie pomiaru z około dwóch godzin (typowych dla systemów komercyjnych) do zaledwie kilku sekund. Metoda pozwalała również na analizę przesłuchów elektrooptycznych, co ma bezpośrednie zastosowanie w procesie kwalifikacji struktur detektorowych.

Wyniki te skłoniły Doktoranta do opracowania skaningowego mikroskopu podczerwieni. W początkowej fazie badań zastosowano półprzewodnikowe lasery cw typu DFB, pracujące przy długościach fali 1550 nm i 2990 nm oraz o mocach kilku miliwatów. Uzyskane obrazy potwierdziły poprawność koncepcji, jednak ujawniły również pewne ograniczenia – niewystarczający stosunek sygnału do szumu oraz rozmycie obrazu na brzegach próbki. Analiza tych efektów pozwoliła określić ograniczenia systemu i doprowadziła do opracowania hiperspektralnego mikroskopu skaningowego z przestrajalnym źródłem OPO (*Optical Parametric Oscillator*), który został opisany w podrozdziale 2.4.

W nowym układzie zastosowano impulsowe źródło OPO, umożliwiające przestrajanie długości fali w zakresie 1,5–4,5 μm oraz tor detekcyjny wyposażony w detektor referencyjny i precyzyjny układ wyzwalania. Rozwiązanie to umożliwiło uzyskanie dużego stosunku sygnału do szumu, dużej rozdzielczości przestrzennej oraz rejestrację hiperspektralnych map odbiciowych dla każdego punktu próbki. Otrzymane obrazy charakteryzowały się bardzo dobrą jakością oraz krótkim czasem akwizycji, co czyni opracowany system atrakcyjną alternatywą dla klasycznych metod hiperspektralnych, w szczególności mikroskopii FTIR w zakresie średniej podczerwieni.

Całość badań przedstawionych w rozdziale 2 należy uznać za spójny cykl prac o charakterze badawczo-wdrożeniowym, wnoszący nową jakość do dziedziny wysokorozdzielczego obrazowania IR z użyciem pojedynczego detektora.

Rozdział 3 – Obrazowanie kompresyjne z wykorzystaniem modulatora DMD

Do najważniejszych osiągnięć Autora opisanych w rozdziale trzecim należy zaliczyć:

- opracowanie i ocenę przydatności modulatora DMD w zakresie podczerwieni,
- wykorzystanie pomiarów kompresyjnych oraz masek Hadamarda,
- opracowanie nowych algorytmów rekonstrukcji obrazu,
- eksperymentalne potwierdzenie możliwości kompresyjnego obrazowania jednopikselowego w podczerwieni z użyciem modulatora DMD.

Autor szczegółowo zbadał właściwości optyczne modulatora DMD, obejmujące transmitancję w zakresie podczerwieni, zjawiska dyfrakcji na mikrolusterkach oraz powtarzalność kątową ich ustawienia. Analiza ta pozwoliła precyzyjnie określić zarówno ograniczenia, jak i możliwości wykorzystania modulatora DMD w precyzyjnych pomiarach optycznych.

Następnie przeprowadził eksperymenty z użyciem masek Hadamarda oraz metody pomiaru pośredniego, wykazując możliwość uzyskania obrazów o wysokiej rozdzielczości i dużym stosunku sygnału do szumu przy krótkim czasie akwizycji. Tym samym potwierdził znaną z teorii kompresyjnego próbkowania zależność, zgodnie z którą pomiar kompresyjny może przewyższać klasyczne skanowanie punkt po punkcie pod względem jakości rekonstrukcji w warunkach niskiego SNR. Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdziły wysoką skuteczność masek Hadamarda w jednopikselowym obrazowaniu kompresyjnym.

Pomimo uzyskanych wyników, rekonstrukcja obrazu z niepełnych danych nadal wymagała udoskonalenia metod numerycznych. W odpowiedzi na to wyzwanie Autor opracował dwa autorskie algorytmy rekonstrukcji.

Zaproponowane metody, wykorzystujące informacje o częstotliwościach przestrzennych obrazu, jego rzadkości (zróżnicowany udział pikseli o wartości zerowej) oraz nieujemności, umożliwiły istotną poprawę dokładności i stabilności procesu rekonstrukcji obrazu.

Uzyskane rezultaty potwierdzają potencjał tej techniki w zakresie podczerwieni jako efektywnej alternatywy dla konwencjonalnych kamer matrycowych i mogą stanowić solidną podstawę do dalszego rozwoju kompaktowych, wielospektralnych systemów jednopikselowego obrazowania.

Rozdział 4 – Porównanie układów obrazujących wykorzystujących kamerę oraz pojedynczy piksel

Rozdział 4 poświęcony jest porównaniu trzech metod obrazowania optycznego: klasycznego z wykorzystaniem kamery matrycowej, skanowania punkt po punkcie oraz jednopikselowego obrazowania kompresyjnego z zastosowaniem modulatora DMD.

Autor analizuje różnice w jakości rekonstrukcji, stosunku sygnału do szumu oraz czasie akwizycji w różnych warunkach pomiarowych, wykazując, że metoda kompresyjna może przewyższać klasyczne systemy, szczególnie przy niskim poziomie sygnału i ograniczonej liczbie pomiarów.

Rozdział 5 – Podsumowanie i perspektywy

Rozdział ten jest bardzo krótki (jednostronicowy) i pełni funkcję podsumowującą – nie przedstawia nowych wyników, lecz syntetyzuje treści zaprezentowane w poprzednich częściach pracy.

3. Ocena oryginalności i nowości naukowej

Rozprawa doktorska mgr. Rafała Stojka charakteryzuje się wysokim poziomem oryginalności oraz znaczną samodzielnością naukową Autora. W pracy wykorzystano znane koncepcje kompresyjnego próbkowania, które Doktorant w twórczy sposób rozwinął i zweryfikował w nowym obszarze widmowym (MWIR), opracowując autorskie rozwiązania zarówno sprzętowe, jak i obliczeniowe.

Autor po raz pierwszy w kraju przeprowadził eksperymentalne badania kompresyjnego obrazowania jednopikselowego w zakresie podczerwieni z wykorzystaniem modulatora DMD, opracował autorskie algorytmy rekonstrukcji obrazów oraz wdrożył system obrazowania rozkładu czułości detektorów IR w praktyce przemysłowej.

Praca wnosi istotne elementy poznawcze, metodyczne i aplikacyjne do dziedziny fotoniki i detekcji promieniowania podczerwonego, a uzyskane wyniki mają zarówno wartość naukową, jak i wdrożeniową. Rozprawa stanowi wartościowy i oryginalny wkład w rozwój metod obliczeniowego obrazowania w podczerwieni oraz może posłużyć jako solidna podstawa do dalszych prac badawczo-rozwojowych w tym obszarze.

4. Ocena metod badawczych, analizy danych i interpretacji wyników

Zastosowane w rozprawie metody badawcze charakteryzują się wysokim poziomem poprawności oraz pełną adekwatnością do postawionych celów. Autor w sposób samodzielny zaprojektował i wykonał układy pomiarowe, łącząc elementy optyki, elektroniki i przetwarzania sygnałów. Analiza danych została przeprowadzona w sposób prawidłowy, z wykorzystaniem odpowiednich metod matematycznych i numerycznych, a interpretacja wyników jest logiczna, spójna i dobrze uzasadniona materiałem eksperymentalnym. Wyniki badań zostały właściwie zaprezentowane i zestawione, co umożliwiło ich rzetelną ocenę oraz jednoznaczne sformułowanie wniosków.

5. Ocena stylu, redakcji i formy pracy

Rozprawa została napisana w sposób dojrzały i komunikatywny, choć miejscami wymaga większej staranności redakcyjnej. Niektóre rysunki mogłyby zostać przygotowane z większą dbałością o czytelność i estetykę prezentacji. W kilku miejscach pojawiają się również pojęcia o charakterze żargonowym, na przykład „detekcyjność” zamiast „wykrywalność znormalizowana”. Ponadto algorytm przedstawiony na stronie 51 mógłby zostać uzupełniony o ilustrację graficzną, co ułatwiłoby jego zrozumienie.

Drobne niedoskonałości językowe i edytorskie nie wpływają jednak na ogólną wartość merytoryczną rozprawy. Praca stanowi zwarte, logicznie spójne i naukowo poprawne opracowanie.

Załączony wykaz cytowanej literatury obejmuje 102 pozycje. Analiza źródeł, zarówno krajowych, jak i międzynarodowych, została przeprowadzona z dużą starannością. Przytoczona literatura jest aktualna, a jej dobór świadczy o szerokiej wiedzy Autora w obszarze tematycznym rozprawy. Wnioski wynikające z przeglądu literatury sformułowano właściwie.

6. Dorobek naukowy doktoranta

Mgr Rafał Stojek jest współautorem trzech publikacji z listy JCR (w tym w dwóch występuje jako pierwszy współautor) oraz dwóch filmów związanych z tematyką rozprawy doktorskiej:

- Pastuszczak, R. Stojek, P. Wrobel, and R. Kotyński, Differential real-time single pixel imaging with Fourier domain regularization: applications to VIS-IR imaging and polarization imaging, *Optics Express*, vol. 29, no. 17, p. 26685, 2021.
- R. Stojek, A. Pastuszczak, P. Wrobel, and R. Kotyński, Single pixel imaging at high pixel resolutions, *Optics Express*, vol. 30, no. 13, pp. 22730–22745, 2022.
- R. Stojek, A. Pastuszczak, P. Wrobel, M. Cwojdzńska, K. Sobczak, and R. Kotyński, High-resolution single-pixel imaging of spatially sparse objects: Real-time imaging in the near-infrared and visible wavelength ranges enhanced with iterative processing or deep learning, *Sensors*, vol. 24, no. 24, 2024.

Część uzyskanych wyników znalazła zastosowanie w praktyce przemysłowej w firmie VIGO Photonics – opracowane urządzenia są wykorzystywane w działach testowania detektorów.

7. Uwagi krytyczne i sugestie dalszych badań

Uwagi te dotyczą przede wszystkim:

- Uściślenia parametrów rozdzielczości przestrzennej.
Warto doprecyzować, czy podana rozdzielczość 50 μm wynika bezpośrednio ze średnicy plamki laserowej, czy też z przyjętego kroku skanowania. Wskazanie zależności między tymi parametrami (np. oversamplingu) pozwoliłoby lepiej ocenić rzeczywistą zdolność rozdzielczą układu.
- Porównanie z literaturą i odniesienie do wcześniejszych metod.
Uzyskane wyniki obrazowania czułości detektorów IR są bardzo dobre, jednak ich szersze zestawienie z metodami opisanymi w literaturze (np. z komercyjnymi systemami do testowania matryc IR) wzmocniłoby przekaz naukowy i pozwoliło lepiej podkreślić skalę osiągniętego postępu.
- Zasadne byłoby nieco szersze omówienie ograniczeń obecnej implementacji układu jednopikselowego z modulatorem DMD, w szczególności: prędkość przełączania mikroluster, wymagań dotyczących synchronizacji toru optycznego i elektronicznego oraz wpływu niestabilności źródła światła na jakość rekonstrukcji. Takie uzupełnienie wzmocniłoby naukowy charakter pracy i stanowiłoby naturalne wprowadzenie do propozycji dalszych badań zaprezentowanych w rozdziale 5.

Przedstawione uwagi mają charakter uzupełniający i nie wpływają na ogólną, bardzo wysoką ocenę rozprawy.

8. Znaczenie i potencjał aplikacyjny

Przedstawione w rozprawie rozwiązania mają znaczny potencjał praktyczny i mogą znaleźć zastosowanie w:

- nieniszczącej kontroli jakości struktur półprzewodnikowych,
- badaniach materiałów w zakresie średniej podczerwieni (m.in. w detekcji defektów),
- obrazowaniu w warunkach niskiego oświetlenia i wysokiego poziomu szumów tła,

- przyszłych systemach hiperspektralnych przeznaczonych do zastosowań militarnych i przemysłowych.

Rozprawa wpisuje się w aktualny, globalny trend integracji optoelektroniki i metod przetwarzania sygnałów w ramach tzw. fotoniki obliczeniowej (ang. *computational photonics*), a uzyskane wyniki mogą stanowić solidną podstawę dla dalszych publikacji naukowych i projektów wdrożeniowych.

9. Konkluzja i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr Rafała Roberta Stojka jest dziełem oryginalnym, samodzielny i reprezentuje wysoki poziom naukowy. Na podstawie przedstawionych analiz, wyników badań oraz ich interpretacji należy stwierdzić, że założone w pracy cele zostały w pełni zrealizowane.

W świetle obowiązujących przepisów ustawy o szkolnictwie wyższym i nauce stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego oraz świadczy o wysokim poziomie wiedzy teoretycznej i praktycznej Kandydata w dyscyplinie, w której ubiega się On o nadanie stopnia doktora.

Zrealizowana praca potwierdza, że Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych, obejmujących zarówno krytyczną analizę aktualnego stanu wiedzy, jak i twórczy, indywidualny wkład w rozwój metod obrazowania w podczerwieni.

Osiągnięte wyniki mają istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne, a sama rozprawa może stanowić ważny punkt odniesienia dla przyszłych krajowych badań w tej dziedzinie.

W związku z powyższym stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku – *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2023 r., poz. 742 z późn. zm.).

Wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr Rafała Roberta Stojka oraz dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony, a po jej pomyślnym przeprowadzeniu – o nadanie mu stopnia doktora w dyscyplinie nauki fizyczne.

Proponuję wyróżnić tę pracę, ponieważ stanowi ona wyjątkowo spójny projekt badawczo-rozwojowy, łączący teorię, modelowanie numeryczne, opracowanie układów eksperymentalnych i ich praktyczne wdrożenie w firmie Vigo Photonics S.A. Autor nie tylko wprowadził oryginalne rozwiązania sprzętowe i obliczeniowe w dziedzinie jednopikselowego obrazowania hiperspektralnego w zakresie MWIR, ale także wykazał się wysoką samodzielnością naukową i dorobkiem publikacyjnym, co czyni rozprawę ważnym punktem odniesienia dla krajowych badań w tej dziedzinie.

