

Warszawa, 5 czerwca 2026 r.

Prof. dr hab. Wojciech DOMINIK
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
Pasteura 5, 02-093 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

M.Sc. Fasih Zareef

**pt. Characterization of novel semiconductor structures for tracking detectors in
high-energy physics experiments using the TCT method**

promotor: dr hab. inż. Agnieszka Obłąkowska-Mucha, prof. AGH

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii
Górniczno-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska dotyczy badania charakterystyk wybranych nowych konstrukcji półprzewodnikowych czujników promieniowania jonizującego pod kątem przydatności w najbardziej wymagających przyszłych akceleratorowych eksperymentach fizyki wysokich energii.

Praca napisana w języku angielskim liczy 175 stron łącznie ze spisem literatury. Dodatkowo Autor zamieścił oddzielnie spisy wykresów i tabel. Rozprawa zbudowana jest z siedmiu rozdziałów, w których Autor przedstawia złożony, wielowątkowy proces badań kolejnych wersji prototypów czujników typu Low-Gain Avalanche Detector (LGAD).

Półprzewodnikowe detektory promieniowania jonizującego w oparciu o krzem stanowią jeden z podstawowych elementów składowych złożonych zestawów aparatury współczesnych akceleratorowych eksperymentów fizyki wysokich energii. Doskonale sprawdziły się w eksperymentach ATLAS i CMS przy akceleratorze LHC gdzie pełniły rolę precyzyjnych hodoskopów pomiaru trajektorii cząstek naładowanych w obszarze bliskim punktu oddziaływania przeciwbieżnych wiązek protonów. Są też istotnie obecne w eksperymentach fizyki jądrowej oraz w medycznej diagnostyce obrazowej wykorzystującej promieniowanie rentgenowskie. Podstawową zaletą płaskich detektorów krzemowych jest duży pierwotny ładunek elektryczny wyzwolony przez cząstkę minimalnej jonizacji w cienkiej warstwie detekcyjnej, co budować wielowarstwowe dwuwymiarowe hodoskopy w bliskim obszarze względem punktu oddziaływania. Miniaturyzacja gęstych macierzy mikroczujników umożliwia dużą precyzję pomiaru pozycji i jednoczesny pomiar dużej liczby bliskich torów.

Przyszłe najbardziej zaawansowane przedsięwzięcia doświadczalne związane z High-Lumi LHC czy w dalszej kolejności Future Linear Collider wymagać będą użycia detektorów wytworzonych z zastosowaniem technologii umożliwiającej masową produkcję cechujących się wysoką granulacją i pracujących w warunkach ekstremalnych fluencji radiacyjnych. Praca Fasiha Zareefa wpisuje się bardzo dobrze w światowy nurt intensywnego tworzenia czujników półprzewodnikowych i badania ich charakterystyk dotyczących odporności radiacyjnej,

wysokiej granulacji umożliwiającej dobrą przestrzenną zdolność rozdzielczą przy możliwie pełnym wypełnieniu powierzchni warstwą aktywną oraz dobrej czasowej zdolności rozdzielczej w reżimie ciągłego obciążenia radiacyjnego. Są to stałe kryteria od czasu pierwszych zastosowań mikropaskowych detektorów krzemowych w zderzaczach e^+e^- pod koniec ubiegłego wieku. Kolejne przedsięwzięcia badawcze fizyki wysokich energii narzucają coraz większe wymagania. Fasih Zareef przeprowadził systematyczne badania charakterystyk kilku wersji produkcyjnych detektorów LGAD ukierunkowane na przydatność wybranych konstrukcji i technologii w konkretnych zadaniach badawczych. Nie jest twórcą koncepcji czujników, ani twórcą technologii ich wytwarzania. Wykonał bardzo solidną pracę badania charakterystyk prądowo-napięciowych oraz czasowych szeregu rozwiązań technicznych czujników oraz symulacje komputerowe Trench Isolated LGAD (TI-LGAD). Systematyczne badania nowych układów detektorów krzemowych i ich technologicznych realizacji mają fundamentalne znaczenie dla podejmowania kolejnych wyzwań badawczych za pomocą akceleratorów następnej generacji. Na pozytywną ocenę zasługuje też udział Autora w tworzeniu stanowiska badawczego charakteryzacji czujników metodą Transient Current Technology (TCT) w laboratorium AGH w Krakowie.

W rozdziale 1 poprzedzonym krótkim wstępem przedstawiającym kontekst badań, Autor w elementarny sposób omawia procesy w złączu $n-p$ formowania i odczytu sygnałów pierwotnej jonizacji w warstwie zubożonej, ogólny mechanizm uszkodzeń radiacyjnych oraz kilka podstawowych struktur detekcyjnych poczynając od diody PiN, przez układy LGAD, a na strukturze tzw. 3D kończąc. Jest to wystarczające wprowadzenie do zasadniczej części rozprawy.

Metodom i technikom stosowanym w badaniach charakterystyk półprzewodnikowych detektorów promieniowania jonizującego poświęcony jest Rozdział 2. Omówione są podstawowe pomiary zależności prądowo-napięciowej oraz pojemnościowo-napięciowej w funkcji napięcia polaryzacji złącza w kierunku zaporowym. Ustalenie napięcia pełnego zubożenia złącza charakteryzuje efektywną grubość warstwy zubożonej oraz koncentrację domieszek, co pozwala ustalić jakość wytworzenia elementarnego czujnika. Szczegółowo omówiona jest metoda badania odpowiedzi czujnika na pobudzenie fotonami wiązki laserowej tzw. *Transient Current Technique* (TCT). Oświetlenie skolimowaną wiązką laserową o długości fali 1060 nm symuluje z dobrym przybliżeniem sygnał od cząstki minimalnej jonizacji trafiającej prostopadle w powierzchnię detektora. Metoda TCT w wersji *Single Photon Absorption* (SPA) jest realizowana na stanowisku badawczym AGH, które zostało zainstalowane z udziałem Autora i było jego podstawowym narzędziem badań wykonanych w ramach rozprawy.

Kolejne cztery rozdziały zawierają prezentację procesu badawczego i wyniki uzyskane dla kilku różnych wariantów detektorów LGAD. W rozdziale 3 Autor bada wpływ naświetleń neutronami i protonami na charakterystyki detekcyjne niewielkich ($1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ aktywna powierzchnia) czujników LGAD wyprodukowanych przez dwóch dostawców. Badane detektory wyprodukowane zostały przez Hamamatsu Photonics K.K. (HPK) i Centro Nacional de Microelectronica (CNM) na waflu o grubości 50 μm . Badane serie czujników poddano niezależnie naświetleniom protonami i neutronami w zakresie zintegrowanej fluencji $4 \times 10^{14} -$

$1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ unormowanej do efektu jonizacji neutronów, co jest bliskie spodziewanej dolnej granicy dawki dla subdetektorów krzemowych CMS i ATLAS podczas kampanii HL-LHC. Oba rodzaje czujników LGAD wykazują silną degradację wzmocnienia przy naświetleniu dawką mniejszą niż 10^{15} , przy czym efekt degradacji jest znacząco silniejszy dla naświetlenia protonami. Autor wiąże ilościowo efekt degradacji wzmocnienia z procesem ubywania domieszek akceptorowych w warstwie wzmocnienia LGAD. Wynik pokazujący, iż produkty HPK pozwalają na prawie dwukrotnie większą dawkę niż produkt CNM jest istotny dla decyzji współpracy CMS i ATLAS o zastosowaniu konkretnego rozwiązania technicznego w zestawach aparatury modernizowanych do HL-LHC.

Rozdział 4 przedstawia badania cienkich czujników LGAD – grubości $20 \mu\text{m}$ i $30 \mu\text{m}$, wytworzonych w laboratorium BNL do precyzyjnych pomiarów czasowych w aparaturze zderzacza Electron Ion Collider (EIC). Seria czujników o rozmiarach $1 \times 1 \text{ mm}^2$ została poddana naświetleniu protonami w IFJ w Krakowie o całkowitych fluencjach 10^{13} cm^{-2} i 10^{14} cm^{-2} , co przewyższa spodziewaną dla EIC dawkę, na którą narażone będą subdetektory do pomiarów czasowych. Metodą TCT zbadano zależność wzmocnienia od napięcia polaryzacji złącza przy różnych intensywnościach wiązki lasera symulujących zmienny depozyt energii jonizacyjnej. Zaobserwowano znaczącą zależność wzmocnienia od jonizacyjnego depozytu energii w złączu – około czterokrotne zwiększenie pierwotnej jonizacji w złączu powoduje prawie dwukrotne zmniejszenie wzmocnienia dla czujnika o grubości $20 \mu\text{m}$. Dla czujnika $30 \mu\text{m}$ redukcja wzmocnienia jest mniejsza – około 20%. Przedstawione przez Autora wyjaśnienie tego efektu jest bardzo ogólne i jakościowe. Sądzę, że zaobserwowany efekt wymaga pełniejszego wyjaśnienia oraz odniesienia do sytuacji spodziewanej w przyszłym eksperymencie akceleratorowym.

Pomiary wykonane metodą TCT dla naświetlonych czujników pokazują zmniejszenie wzmocnienia o, odpowiednio, 50% i 70% dla mniejszej i większej całkowitej fluencji dla czujnika o grubości $20 \mu\text{m}$. Niestety Autor nie podaje odpowiednich danych dla czujnika o grubości $30 \mu\text{m}$ i nie podaje też powodów pominięcia tej istotnej informacji. Silne naświetlenie powoduje degradację czasowej zdolności rozdzielczej obu rodzajów czujników z początkowych 50ps do około 110ps i 190ps dla maksymalnej dostarczonej dawki waflom o grubościach, odpowiednio, $20 \mu\text{m}$ i $30 \mu\text{m}$. Przedstawiona dyskusja obserwacji jest bardziej niż lapidarna. Oczekiwałbym pełniejszej dyskusji obserwowanej degradacji wzmocnienia i czasowej zdolności rozdzielczej podczas publicznej obrony. W podsumowaniu rozdziału 4 Autor pisze, iż tzw. odporność radiacyjna badanych czujników spełnia wymagania EIC i mogą być zastosowane w aparaturze eksperymentalnej do pomiarów czasowych. Trudno ocenić poprawność tego stwierdzenie wobec braku przedstawienia wymagań na rozdzielczość czasową wymaganą w aparaturze EIC.

Rozdział 5 przedstawia próbę zwiększenia wypełnienia obszaru aktywnego powierzchni elementarnego piksela poprzez zastosowanie technologii Trench Isolated LGAD (TI-LGAD) polegającej na wytworzeniu cienkiego ($\sim 2 \mu\text{m}$) rowka oddzielającego sąsiednie piksele wypełnionego dwutlenkiem krzemu jako izolatorem. Autor badał charakterystyki prądowo-napięciowe oraz funkcjonalne kilku wariantów czujników TI-LGAD wytworzonych wspólnie przez firmy Micron Semiconductor Ltd. oraz Scottish Microelectronics Centre. Etap

produkcyjny został poprzedzony symulacjami wykonanymi przez Autora rozprawy. Pomiary wykonywane metodą TCT pokazały, iż wzmocnienie ładunkowe nie zmieniło się w stosunku do standardowych LGAD przy jednoczesnej bardzo dobrej separacji sygnałów generowanych w sąsiednich celkach. Szerokość obszaru martwego wokół izolatora jest mniejsza niż $10\mu\text{m}$, co znacząco zwiększa tzw współczynnik wypełnienia w stosunku do standardowego LGAD. Dodatkowe badania wykonane metodą TTC z absorpcją dwufotonową w ośrodku ELI Beamlines pozwoliły scharakteryzować działanie czujnika w funkcji głębokości powstawania sygnału w warstwie oraz stopnia domieszkowania warstwy wzmacniającej sygnały. Zbadanie tych zależności pozwoli na optymalizację struktury czujników i stopnia domieszkowania.

Standardowe LGAD nie spełniają wymagań przyszłych etapów eksperymentów CMS i ATLAS ze względu na znaczącą degradację parametrów związaną z naświetlaniem dużymi strumieniami promieniowania. Badane są więc inne konstrukcje detektorów krzemowych z wewnętrznym wzmocnieniem. Badaniom charakterystyk jednej z technicznych propozycji Autor poświęcił Rozdział 6. Ciekawe rozwiązanie, polegające na implantacji tworzącej gęsty układ złącz wewnątrz wafla o grubości $285\mu\text{m}$ i zorientowanych prostopadle do jego powierzchni, nazwane jest detektorem 3D. Dwie serie detektorów tego typu zostały wykonane przez CNM – jedna o heksadecymalnym (2-X) układzie kolumn implantacyjnych z odległością $85\mu\text{m}$ od centralnej kolumny, druga w układzie kwadratowym (1-X) z centralną kolumną odległą o $55\mu\text{m}$ od boku kwadratu. Badaniom charakterystyki prądowo napięciowej poddano 30 komórek heksagonalnych i 60 komórek kwadratowych. Przedstawione na wykresach 6.4 i 6.5 wyniki pomiarów pokazują bardzo duży rozrzut zależności prądu upływu od napięcia wewnątrz każdej grupy. Niestety duża gęstość krzywych zaznaczonych podobnymi kolorami nie pozwala czytelnikowi przypisać konkretne krzywe do lokalizacji celek na płaszczyźnie wafla. Do badań zależności czasowych wybrano po jednej komórkę każdego typu bez wskazania na wykresie które krzywe prądowo-napięciowe je charakteryzują. Można tylko zakładać, że były to komórki o charakterystykach najbliższych oczekiwanym. Pomiary wydajności zbierania ładunku dla wybranych komórek zostały wykonane metodą TCT z wiązką laserową o średnicy plamki około $15\mu\text{m}$ (FWHM). Wyniki naświetleń od strony przedniej detektora 2-X pokazują dobrą i w miarę jednorodną wydajność zbierania ładunku w obszarze piksela (Rysunek 6.8). Analogiczne pomiary wykonane dla struktury 1-X, których wyniki przedstawione są na Rysunku 6.9, pokazują, w ocenie recenzenta, że obszar komórki jest „martwy”. Co prawda Fahid Zareef pisze, że dla struktury 1-X powierzchnia przezroczysta dla wiązki lasera od strony przedniej wynosi $10\text{--}15\mu\text{m}$ (znacznie mniej niż powierzchnia piksela), ale podejmuje rozważania o wpływie niejednorodności wewnętrznego pola elektrycznego na wydajność zbierania danych. W mojej ocenie pomiar ten, ze względu na nieprzezroczystość powierzchni przedniej, nie niesie informacji charakteryzującej strukturę 1-X. Oczekiwałbym pełniejszej dyskusji tego pomiaru. Pomiary TCT wykonane przy naświetlaniu czujników od strony tylnej po usunięciu z niej metalizacji pokazują pełną aktywność powierzchni piksela dla obu badanych struktur z wydajnością zbierania ładunku rosnącą wraz z napięciem polaryzacji. Szkoda, że dyskusja tej obserwacji jest szczątkowa, a wyniki dla struktury 1-X przedstawione na Rysunku 6.11 nie są w ogóle dyskutowane. Badania charakterystyk czasowych obu struktur pokazują dobrą czasową zdolność rozdzielczą dla napięć odpowiadających pełnemu zaobciążeniu złącza: 67ps dla 1-X i 94.5ps dla 2-X. Autor

wiąże lepszą rozdzielczość uzyskaną dla struktury kwadratowej z mniejszymi rozmiarami komórki. Pomiary czasowe mogą jednak sugerować pewien problem z wydajnością zbierania ładunku w obszarze piksela. Trzy przebiegi pokazane na Rysunku 6.13a dla różnych odległości od centrum wskazują na znaczącą redukcję amplitudy dla położen bardziej odległych. Oczekuję dyskusji tej obserwacji podczas obrony.

Wyniki pomiarów dwóch wybranych próbek detektorów 3D są obiecujące – pokazują, że taka konfiguracja detektora może spełnić wymagania eksperymentów przy High-Lumi LHC. Podstawową kwestią pozostaje osiągnięcie technologicznej powtarzalności wytwarzania detektorów oraz ich odporność radiacyjna. Aspekty te nie wchodziły w zakres przedstawionej rozprawy.

W krótkim podsumowaniu Autor wskazuje stworzenie i ugruntowanie międzynarodowej współpracy zespołu naukowego AGH jako wartość dodaną prac badawczych.

Struktura, układ i język pracy są poprawne, chociaż Autor nie ustrzegł się błędów i niedostatecznej precyzji w prezentacji wyników i ich interpretacji.

Kilka zauważonych kwestii:

- Rysunek 6.11 nie został omówiony w tekście rozprawy
- Tekst na str. 160 omawiający Rysunek 6.17 mówi, iż wartość MAD dla struktury 1-X wynosi ~ 110 ps, podczas gdy na odpowiednim rysunku wartość ta jest zaznaczona jako 78.3 ps
- Nie jest wyjaśniona wzmiankowana w tekście technologia p-spray
- Str. 152: stwierdzenie o tłumieniu fotonów 1060 nm w warstwie Ti/TiO₂ nie jest poparte odniesieniem do odpowiedniego źródła lub danych pomiarowych
- Użyte na samym początku pracy pojęcie „4D tracking” wymaga wyjaśnienia, by motywacja pracy stała się bardziej zrozumiała dla czytelnika niewtajemniczonego w przyjętą w środowisku nomenklaturę
- Prędkość dryfu w wyrażeniu (1.8) jest niepoprawnie oznaczona
- Nie są zdefiniowane wszystkie użyte w wyrażeniu (2.7) oznaczenia
- Nie jest pokazane, że procentowa skala DAC tłumienia intensywności wiązki lasera odpowiada liniowemu tłumieniu (str.95)
- Czy na pewno skala na wykresie 4.15b jest w nanosekundach, co wskazywałoby niespójność z wykresem 4.15a?

Wniosek końcowy

W podsumowaniu stwierdzam, że badania przedstawione w rozprawie Fasiha Zareefa są oryginalne i stanowią ważny wkład w proces tworzenia nowatorskich struktur i technologii półprzewodnikowych detektorów promieniowania jonizującego. Z pewnością wyniki będą wykorzystane przez innych w dalszych pracach nad przygotowaniem kolejnych zaawansowanych akceleratorowych eksperymentów fizyki cząstek oraz w tworzeniu systemów diagnostycznych obrazowania medycznego z wykorzystaniem fotonów X. Praca pokazuje obszerną wiedzę i umiejętności Doktoranta w zagadnieniach związanych z tematyką rozprawy.

Wymienione uchybienia nie wpływają negatywnie na odbiór i ocenę rozprawy. Rozprawa w sposób wystarczający prezentuje i poprawnie interpretuje wyniki badań detektorów półprzewodnikowych zgodnie z przyjętą metodyką. Na pewno jest dobrą podstawą do podejmowania dalszych prac nad tworzeniem pikselowych modułów półprzewodnikowych detektorów promieniowania jonizującego. Fasih Zareef wykazał dobre opanowanie warsztatu badawczego i narzędzi symulacyjnych oraz umiejętność pracy w międzynarodowych zespołach naukowych.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania wymagań określonych w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.



Wojciech DOMINIK