

dr hab. Andrzej Bożek, prof. Instytutu
Particle Physics and Astrophysics Department
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
ul. Radzikowskiego 152, Kraków

Kraków, 20 maja 2026

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Fasih Zareefa

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

Rozprawa doktorska pana mgr. Fasih Zareefa została przygotowana na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Praca została wykonana w dyscyplinie nauki fizyczne, pod kierunkiem dr hab. inż. Agnieszki Obłąkowskiej-Muchy, prof. AGH. Tematem rozprawy jest charakteryzacja nowoczesnych krzemowych struktur półprzewodnikowych. Są one przeznaczone do detektorów śladowych przyszłych eksperymentów fizyki wysokich energii. Ważną rolę w pracy odgrywa technika TCT, czyli *Transient Current Technique*.

Tematyka rozprawy jest bardzo aktualna. W nowych eksperymentach fizyki wysokich energii detektory muszą dokładnie mierzyć położenie cząstki. Coraz ważniejszy staje się także pomiar czasu jej przejścia przez detektor. Jest to szczególnie istotne przy HL-LHC. W jednym przecięciu wiązek będzie tam zachodziło bardzo dużo zderzeń jednocześnie. Sam pomiar położenia może wtedy nie wystarczyć. Trzeba jeszcze wiedzieć, z którego zderzenia pochodzi dany ślad.

Taki sposób rekonstrukcji nazywa się często *4D tracking*, czyli czterowymiarowym śledzeniem cząstek. Oznacza to, że dla cząstki, albo dla punktu jej śladu, mierzymy trzy współrzędne przestrzenne oraz czas. Innymi słowy, oprócz informacji „gdzie” potrzebna jest także informacja „kiedy”. Dzięki temu łatwiej rozdzielać ślady pochodzące z różnych zderzeń, które zachodzą bardzo blisko siebie.

Praca mgr. Fasih Zareefa dotyczy właśnie detektorów, które mogą być użyte w takich układach. Autor bada cienkie detektory lawinowe o niskim wzmocnieniu, struktury TI-LGAD oraz detektory 3D. Wszystkie te technologie mają pomóc w budowie detektorów szybkich, dokładnych i odpornych na promieniowanie. Ważne są tu czasy odpowiedzi rzędu kilkudziesięciu pikosekund. Ważne jest także zachowanie dobrych parametrów po napromienieniu. Rozprawa jest więc dobrze związana z rzeczywistymi potrzebami przyszłych eksperymentów.

Rozprawa liczy 185 stron i jest zorganizowana w siedem rozdziałów. Po części wprowadzającej autor przedstawia podstawy działania detektorów krzemowych. Omawia transport nośników, działanie złącza p-n, procesy jonizacji, wzmocnienie lawinowe oraz skutki uszkodzeń radiacyjnych. Ta część ma charakter podręcznikowy. Jest jednak potrzebna, ponieważ dalsze rozdziały opierają się na związku między domieszkowaniem, polem elektrycznym, transportem ładunku i czasem odpowiedzi detektora.

Drugi rozdział opisuje metody pomiarowe używane w pracy. Autor omawia przede wszystkim pomiary elektryczne I/V i C/V oraz pomiary laserowe metodą TCT. Metoda TCT pozwala sprawdzić, jak detektor odpowiada na krótki impuls lasera. W ten sposób można badać zbieranie ładunku i czas odpowiedzi sensora. Autor opisuje także techniki SPA-TCT i TPA-TCT. Są one przydatne, ponieważ pozwalają badać różne obszary detektora i lepiej zrozumieć rozkład pola elektrycznego wewnątrz sensora. Ważnym elementem pracy było również uruchomienie i wykorzystanie stanowiska TCT na AGH. Jest to istotny praktyczny wkład doktoranta.

Rozdział trzeci dotyczy zmian zachodzących w strukturach LGAD po napromienieniu neutronami i protonami. Autor badał struktury wykonane przez HPK i CNM. Głównym problemem jest degradacja warstwy wzmocnienia. Jest to część detektora odpowiedzialna za zwiększenie sygnału. Po napromienieniu warstwa ta działa słabiej. Pogarsza to parametry detektora. Autor porównuje wpływ neutronów i protonów. Pokazuje, że protony powodują silniejszą degradację warstwy wzmocnienia niż

neutrony, nawet po przeliczeniu na tzw. fluencję równoważną neutronom 1 MeV, czyli standardową miarę poziomu uszkodzeń radiacyjnych w krzemie. Wynik ten pokazuje, że odporność radiacyjna tych sensorów zależy nie tylko od tego, jak silnie zostały napromienione, ale także od rodzaju promieniowania oraz od szczegółów konstrukcji warstwy wzmocnienia.

Rozdział czwarty opisuje badania bardzo cienkich krzemowych detektorów z wewnętrznym wzmocnieniem wykonanych w BNL. Miały one grubość aktywną 20 i 30 μm . Autor analizuje ich zachowanie przed i po napromienieniu. Zwraca uwagę na prąd upływu, wzmocnienie, stabilność pracy i rozdzielczość czasową. Przed napromienieniem detektory osiągały wzmocnienie rzędu 20–25 przy napięciach bliskich przebiciu. Rozdzielczość czasowa wynosiła około 50 ps. Po napromienieniu wzrastał prąd upływu i zmniejszało się wzmocnienie. Jest to zgodne z oczekiwaniami. Wyniki pokazują jednak, że cienkie sensory pozostają ciekawą technologią dla szybkich detektorów czasowych. Dotyczy to zwłaszcza zastosowań, w których poziom promieniowania nie jest ekstremalnie wysoki.

Najobszerniejszy i moim zdaniem najważniejszy rozdział piąty dotyczy struktur TI-LGAD. Są to detektory z izolacją rowkową między pikselami. Ta część pracy jest bardzo ważna, ponieważ dotyczy jednego z głównych problemów klasycznych segmentowanych detektorów tego typu. Między pikselami powstają w nich obszary mniej czułe albo prawie martwe. Zmniejsza to efektywną powierzchnię aktywną detektora. Autor bada dwie serie struktur TI-LGAD. Wykorzystuje pomiary elektryczne, pomiary TCT i TPA-TCT oraz symulacje TCAD.

Wyniki pokazują, że izolacja rowkowa może znacznie zmniejszyć obszar nieaktywny między pikselami. W standardowych rozwiązaniach taki obszar ma zwykle kilkadziesiąt mikrometrów. W badanych strukturach TI-LGAD udało się zejść poniżej 10 μm . Jest to bardzo dobry wynik z punktu widzenia budowy detektorów o małych pikselach i dobrej rozdzielczości przestrzennej. Z pracy wynika także, że rozmiar obszaru nieaktywnego zależy nie tylko od samej geometrii rowka. Zależy również od pola elektrycznego, domieszkowania warstwy wzmocnienia i miejsca, w którym powstaje ładunek. Druga seria struktur dawała lepszą izolację między pikselami. Pojawił się jednak problem wczesnego przebicia. To cenna wskazówka dla dalszego rozwoju tej technologii.

Rozdział szósty dotyczy detektorów 3D wykonanych w technologii dwustronnej. Porównano dwie geometrie pikseli: kwadratową i sześciokątną. Pomiary elektryczne pokazują, że geometria sześciokątna ma niższy prąd upływu i pozwala zebrać większy ładunek. Pomiary czasowe pokazują jednak przewagę geometrii kwadratowej. Daje ona bardziej jednorodny czas odpowiedzi w różnych miejscach piksela. Przy napięciu 30 V rozrzut czasu przyjścia sygnału wynosi około 67 ps dla pikseli kwadratowych i około 94,5 ps dla pikseli sześciokątnych. Autor tłumaczy tę różnicę większymi odległościami między kolumnami n^+ i p^+ w geometrii sześciokątnej. Prowadzi to do słabszego pola elektrycznego w części detektora. Powoduje też większą zależność czasu zbierania ładunku od miejsca, w którym powstał sygnał.

Rozdział siódmy zbiera najważniejsze wyniki pracy. Dobrze pokazuje on logiczną drogę rozprawy. Najpierw autor bada, jak promieniowanie niszczy warstwę wzmocnienia w detektorach lawinowych o niskim wzmocnieniu. Następnie analizuje pracę bardzo cienkich struktur z wewnętrznym wzmocnieniem. Potem przechodzi do struktur TI-LGAD jako sposobu na zmniejszenie martwych obszarów między pikselami. Na końcu ocenia detektory 3D jako możliwą technologię dla jeszcze trudniejszych warunków radiacyjnych. Wspólnym tematem tych badań jest pytanie, które technologie mogą najlepiej sprawdzić się w przyszłych detektorach śladowych z pomiarem czasu.

Ocena naukowa i mocne strony rozprawy

Rozprawa ma wyraźnie eksperymentalny charakter. Nie jest to tylko analiza gotowych danych. Doktorant zajmuje się całym procesem badania sensorów: od uzasadnienia fizycznego, przez projektowanie i symulacje, udział w przygotowaniu struktur, pomiary elektryczne i laserowe, aż po analizę wyników. Istotna jest również ich interpretacja w kontekście przyszłych eksperymentów fizyki wysokich energii. Taki zakres pracy oceniam bardzo pozytywnie.

Mocną stroną rozprawy jest szerokie spojrzenie na problem. Badane są różne rozwiązania, które mogą być użyte do budowy szybkich detektorów krzemowych. Dzięki temu praca nie ogranicza się do jednego typu sensora, lecz pokazuje szerszy obraz zagadnienia. Chodzi o budowę układu, który będzie szybki, dobrze segmentowany i stabilny po napromienieniu. Omawiane technologie są różne, ale wszystkie badania prowadzą do tego samego celu.

Szczególnie wysoko oceniam część poświęconą strukturom TI-LGAD. Przedstawione wyniki wskazują, że izolacja rowkowa może być realną drogą do zmniejszenia obszarów nieaktywnych między pikselami. Cenne jest też to, że technologia ta nie jest przedstawiona jako rozwiązanie pozbawione problemów. W pracy omówiono również ograniczenia, takie jak wczesne przebicie w części badanych struktur. Takie podejście jest rozsądne i dobrze oddaje rzeczywisty charakter badań nad nową technologią detektorową.

Istotne są również badania detektorów 3D. Ten przykład dobrze ilustruje, że wybór geometrii detektora wymaga kompromisu. Nie zawsze największy zebrany ładunek oznacza najlepszy detektor czasowy. Dla zastosowań z pomiarem czasu równie ważna jest jednorodność odpowiedzi w całym pikselu. Jest to ciekawy wynik, przydatny przy dalszym projektowaniu takich struktur.

Na pozytywną ocenę zasługuje także dorobek publikacyjny doktoranta. Z deklaracji autora wynika, że praca jest związana z kilkoma publikacjami. Dotyczy to między innymi artykułu o strukturach TI-LGAD, w którym doktorant był pierwszym i korespondencyjnym autorem. Autor prezentował też wyniki na konferencjach. Odbił również staże w ważnych ośrodkach, między innymi w JSI, CERN, University of Glasgow i CNM Barcelona, które mogą być użyte do budowy szybkich detektorów krzemowych. Dzięki temu praca pokazuje szerszy obraz problemu. Chodzi o budowę detektora, który będzie szybki, dobrze podzielony na małe elementy i odporny na promieniowanie. Omawiane technologie są różne, ale rozprawa pozostaje spójna. Wszystkie badania dotyczą tego samego celu.

Szczególnie wysoko oceniam część poświęconą strukturom TI-LGAD. Autor pokazuje, że izolacja rowkowa jest realną drogą do zmniejszenia obszarów nieaktywnych między pikselami. Ważne jest też to, że nie przedstawia tej technologii jako rozwiązania bez problemów. Omawia ograniczenia, takie jak wczesne przebicie w części badanych struktur. Takie podejście jest rozsądne. Dobrze pokazuje rzeczywisty charakter pracy nad nową technologią detektorową.

Istotne są również badania detektorów 3D. Ten przykład dobrze ilustruje, że wybór geometrii detektora wymaga kompromisu. Nie zawsze największy zebrany ładunek oznacza najlepszy detektor czasowy. Dla zastosowań z pomiarem czasu równie ważna jest jednorodność odpowiedzi w całym pikselu. Jest to ciekawy wynik, przydatny przy dalszym projektowaniu takich struktur.

Na pozytywną ocenę zasługuje także dorobek publikacyjny doktoranta. Z deklaracji autora wynika, że praca jest związana z kilkoma publikacjami. Dotyczy to między innymi artykułu o strukturach TI-LGAD, w którym doktorant był pierwszym i korespondencyjnym autorem. Autor prezentował też wyniki na konferencjach. Odbił również staże w ważnych ośrodkach, między innymi w JSI, CERN, University of Glasgow i CNM Barcelona. Świadczy to o tym, że badania doktoranta były częścią szerszych prac prowadzonych w międzynarodowym środowisku.

Na podkreślenie zasługuje także praktyczny wymiar rozprawy. Praca doktoranta przyczyniła się do rozwoju stanowiska pomiarowego TCT na AGH oraz procedur pomiarowych i analitycznych. Dzięki temu część wykonanych prac ma znaczenie nie tylko dla samej rozprawy. Może być też wykorzystana w dalszych badaniach nad detektorami krzemowymi prowadzonych w Krakowie.

Ocena pracy

Rozprawę oceniam wysoko. Jak każda praca eksperymentalna ma ona jednak elementy, które można było przedstawić nieco pełniej albo bardziej syntetycznie.

Część wprowadzająca, dotycząca podstaw fizyki półprzewodników, jest dość obszerna. Jest poprawna

i może być użyteczna dla czytelnika mniej zaznajomionego z tą tematyką. W rozprawie doktorskiej poświęconej detektorom można by jednak miejscami skrócić opis podstawowy. Więcej miejsca można było przeznaczyć na porównanie uzyskanych wyników z wynikami innych grup pracujących nad podobnymi technologiami.

Przy tak wielu badanych strukturach przydatne byłoby jedno końcowe zestawienie najważniejszych parametrów. Mam tu na myśli na przykład napięcia pracy, prądy upływu, wzmocnienie, rozdzielczość czasową, wielkość obszaru nieaktywnego oraz odporność na promieniowanie. Autor omawia te wielkości w odpowiednich rozdziałach. Jedna zbiorcza tabela w podsumowaniu ułatwiłaby jednak czytelnikowi porównanie poszczególnych technologii.

W przypadku struktur TI-LGAD interesująca byłaby bardziej bezpośrednia dyskusja o tym, co obecnie najbardziej ogranicza ich dalszy rozwój. Może to być wczesne przebicie, jednorodność pola elektrycznego, powtarzalność procesu technologicznego, połączenie z elektroniką odczytu albo zachowanie izolacji rowkowej po napromienieniu. Autor wspomina o tych zagadnieniach. Podczas obrony warto byłoby jednak poprosić go o wskazanie, które z nich uważa za najważniejsze.

W przypadku detektorów 3D wyniki pokazują ciekawy kompromis między wielkością zebranego ładunku a jednorodnością czasu odpowiedzi. Byłoby wartościowe, aby autor szerzej przedyskutował, który z tych parametrów powinien być najważniejszy dla konkretnego zastosowania. Może to dotyczyć na przykład VELO Upgrade-II, FCC albo warstw czasowych przyszłych eksperymentów.

Warto również zwrócić uwagę na drobne kwestie językowe i edytorskie. W podpisach rysunków i w tekście pojawiają się miejscami różne określenia tych samych wielkości. Dotyczy to na przykład zapisów: bias voltage, reverse bias voltage, voltage, collected charge, charge collection, ToA czy signal time. Przydałoby się ujednolicenie tych nazw. Warto też konsekwentnie podawać jednostki przy osiach i skalach kolorów. W kilku miejscach podpisy rysunków są bardzo krótkie. Czytelnik musi wtedy szukać dodatkowego wyjaśnienia w tekście głównym. Nie jest to poważny zarzut. Przy pracy eksperymentalnej opartej na dużej liczbie wykresów większa konsekwencja w opisie rysunków byłaby jednak korzystna.

Powyższe uwagi nie zmieniają mojej bardzo pozytywnej oceny rozprawy. Traktuję je raczej jako pytania i sugestie. Mogą one zostać rozwinięte podczas publicznej obrony.

Pytania do doktoranta

Prosiłbym doktoranta o odniesienie się do kilku pytań. Część z nich wynika zapewne z faktu, że nie jestem specjalistą od projektowania detektorów krzemowych. Interesuje mnie więc szczególnie fizyczna interpretacja uzyskanych wyników.

W pracy pokazano, że protony powodują silniejszą degradację warstwy wzmocnienia niż neutrony, nawet po przeliczeniu na fluencję równoważną neutronom 1 MeV. Jak autor interpretuje ten wynik? Czy oznacza to ograniczenia prostego skalowania NIEL w przypadku warstwy wzmocnienia w detektorach LGAD? Czy raczej wynika to ze specyfiki lokalnych uszkodzeń w tej części detektora?

Cienkie sensory z wewnętrznym wzmocnieniem dają szybkie sygnały. Po napromienieniu tracą jednak część wzmocnienia. Jakie kompromisy pomiędzy grubością detektora, napięciem pracy, wzmocnieniem i stabilnością działania uznałby doktorant za najlepsze dla zastosowań w eksperymentach takich jak HL-LHC lub EIC?

W strukturach TI-LGAD udało się zmniejszyć efektywny obszar nieaktywny do wartości poniżej 10 μm . Co, zdaniem autora, najbardziej ogranicza dalsze zmniejszanie tego obszaru? Czy jest to technologia trawienia rowków, ryzyko przebicia, izolacja między pikselami czy profil domieszkowania?

Jaką dodatkową informację daje technika TPA-TCT w porównaniu ze standardową SPA-TCT przy badaniu struktur segmentowanych? Jak pomaga ona w analizie pola elektrycznego w pobliżu rowków izolacyjnych?

W rozdziale dotyczącym detektorów 3D pokazano, że geometria sześciokątna daje lepsze własności elektryczne i większy zebrany ładunek. Geometria kwadratowa zapewnia natomiast bardziej jednolity czas odpowiedzi. Jak, zdaniem autora, należy wybrać optymalną geometrię detektora 3D do zastosowań w rekonstrukcji śladów „4D”? Czy ważniejszy jest większy sygnał, bardziej jednolity czas odpowiedzi, odporność na promieniowanie, czy raczej kompromis między tymi cechami?

W rozprawie porównano kilka technologii detektorów krzemowych: cienkie detektory LGAD, struktury TI-LGAD oraz detektory 3D. Która z tych technologii wydaje się doktorantowi najbardziej obiecująca dla przyszłych detektorów śladowych z pomiarem czasu? Proszę uwzględnić zarówno wyniki pomiarów, jak i kwestie praktyczne. Chodzi między innymi o możliwość produkcji większych powierzchni, powtarzalność technologii oraz połączenie z elektroniką odczytu.

Ocena konkluzji i wniosków

Wnioski przedstawione w rozprawie są dobrze powiązane z uzyskanymi wynikami pomiarowymi. Autor nie próbuje sprowadzić całej pracy do jednego prostego rezultatu. Pokazuje raczej szerszy i bardziej realistyczny obraz rozwoju detektorów przeznaczonych do *4D tracking*. Różne technologie zostały potraktowane jako możliwe odpowiedzi na różne ograniczenia przyszłych detektorów. Chodzi o szybkość odpowiedzi, odporność na promieniowanie, segmentację oraz możliwość uzyskania dużej efektywnej powierzchni aktywnej.

Perspektywy dalszych badań są w pracy dość jasno zarysowane. W przypadku klasycznych i cienkich detektorów z wewnętrznym wzmocnieniem kluczowe pozostaje zwiększenie odporności warstwy wzmocnienia na promieniowanie. Ważne jest też utrzymanie stabilnej pracy przy wysokim poziomie napromienienia. Dla struktur TI-LGAD najważniejszym zadaniem jest dalsza optymalizacja geometrii rowków, profilu domieszkowania i napięć pracy. Celem jest jednoczesne uzyskanie wysokiego fill factor, dobrej izolacji między pikselami i uniknięcie wczesnego przebicia. W przypadku detektorów 3D dalszy rozwój powinien koncentrować się nie tylko na maksymalizacji zebranego ładunku. Ważna jest także możliwie jednolita odpowiedź czasowa w całej objętości piksela. Wyniki przedstawione w rozprawie dają konkretne wskazówki dla dalszego projektowania takich struktur.

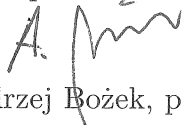
Konkluzja końcowa

Podsumowując, rozprawa doktorska pana mgr. Fasih Zareefa stanowi wartościowy wkład w rozwój krzemowych detektorów dla fizyki wysokich energii. Temat jest ważny i aktualny. Chodzi o budowę detektorów łączących dobrą rozdzielczość czasową, odporność na promieniowanie i możliwość pracy w układach o dużej segmentacji. Autor przedstawił wyniki badań kilku technologii detektorowych. Wykonał szeroki zestaw pomiarów. Pokazał też zalety oraz ograniczenia poszczególnych rozwiązań. Rozprawa pokazuje, że doktorant dobrze rozumie fizykę detektorów półprzewodnikowych. Potrafi prowadzić samodzielne pomiary, analizować ich wyniki oraz interpretować je w kontekście przyszłych zastosowań eksperymentalnych.

Uważam również, że rozprawa zasługuje na wyróżnienie. Przemawia za tym szeroki zakres wykonanej pracy, widoczny samodzielny wkład doktoranta, bardzo aktualna tematyka oraz fakt, że część wyników została opublikowana w recenzowanych czasopismach i przedstawiona na konferencjach międzynarodowych.

Stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie nauki fizyczne. Wnoszę o dopuszczenie mgr. Fasih Zareefa do dalszych etapów postępowania doktorskiego, w szczególności do publicznej obrony rozprawy. Wnioskuje także o wyróżnienie rozprawy.

z poważaniem



dr hab. Andrzej Bożek, prof. IFJ PAN

