

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

Kraków, 10 Października 2019

Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr inż. Szymona Bugiela zatytułowanej:

Development of monolithic pixel detectors

Przedstawiona mi do recenzji praca, dotyczy badań nad rozwojem monolitycznych detektorów mozaikowych opartych o technologię *Silicon on Insulator* (SOI).

Głównym celem pracy było badanie monolitycznych detektorów mozaikowych w oparciu o technologię LAPIS 200nm. Istotą technologii jest cienka warstwa krzemu w której implementuje się czynna elektronika osadzona na podłożu krzemowym izolowanym od warstwy czynnej. Warstwa substratu stanowi też element detekcyjny.

Pełne prace badawcze zostały przeprowadzone na detektorach INTPIX6, rozwijane w Japonii w laboratorium KEK. Pracują one w trybie całkującym. Na bazie zebranych doświadczeń Doktorant, wraz z całą grupą, przygotowywał kolejne prototypy detektorów. Pierwszy którego zadaniem było zapoznanie się z charakterystykami detektorów w zależności od podłoża i geometrią detektora. Zebrane wyniki pozwolą w przyszłości zminimalizować wpływ sensora na elektronikę odczytu. W szczególności przygotowano prototyp detektora dla CLIC. Tu dodatkową cechą wymaganą od detektora jest możliwość pomiaru czasu przybycia cząstki z dużą dokładnością. Wyniki symulacji wyglądają obiecująco.

Praca mgr inż. Szymona Bugiela, napisana w języku angielskim, składa się ze streszczenia, wstępu, pięciu rozdziałów, konkluzji, dodatku, bibliografii zawierającej 43 pozycje i liczy 103 strony.

Wstęp, który spełnia rolę wprowadzenia, spełnia swoją rolę, ale jest także przemyślanym wprowadzeniem do tematyki pracy. Czytając pracę odkrywa się zalety i strukturę pracy którymi autor się pochwaliła na początku, ale nie zaakcentował ich znaczenia. Brakuje tu omówienia która część przedstawionych badań zostały wykonane przez autora. Założyłem że zdecydowana większość treści zawartych w trzech ostatnich, merytorycznych rozdziałów jest pracą wykonaną przez pana Bugiela.

Rozdział pierwszy zawiera ogólne wprowadzenie do tematyki krzemowych detektorów jonizacyjnych. Na początku mamy rys historyczny rozwoju detektorów krzemowych, który w drugim podrozdziale przekształca się we wprowadzenie do ogólnego opisu półprzewodników w szczególności złącza p-n jako detektora cząstek dalej auto przechodzi do teorii oddziaływania cząstek elementarnych z materią. Samo połączenie ze sobą obu tematów w jednym podrozdziale nie jest dla mnie zupełnie zrozumiałe. Podoba mi się dogłębny opis oddziaływania z materią, przy czym nie do końca rozumiem jego rolę w tej pracy. Rozdział kończy się najbardziej interesującym podrozdziałem opisującym monolityczne detektory mozaikowe. Doceniam opis technologii używanych do produkcji takich detektorów (DEP-FET, High Voltage CMOS, High Resistivity CMOS, Silicon-on-Insulator CMOS). Moim zdaniem w przeciwieństwie do opisanej w następnym rozdziale technologii SOI, opis innych metod jest nieco zbyt skrótowy. Brakuje mi biografii opisującej poszczególne technologie oraz sekcji opisującego sumarycznie ich wady i zalety w stosunku do siebie. Widać z tego rozdziału zrozumienie przez autora fizyki leżącej u podstaw detekcji cząstek w detektorach krzemowych wraz z

Rozdział drugi, zatytuowany „Silicon-On-Insulator technology” ma za zadanie opisanie technologii SOI. Poprawny, pełny opis. Jako człowiek spoza branży oczekiwałbym trochę bardziej dogłębnego

rozpoznania pozwalającego pogłębić moją wiedzę na ten temat. Rozumiem jednak ograniczenie wynikające z rozmiarów pracy. Dlatego czytelnika zainteresowanego tą technologią pożyteczne były by bardziej odesłanie do większej liczby pozycji bibliograficznych opisujących zagadnienie.

Tu następują trzy, merytoryczne rozdziały, opisujące główne kierunki badań nad detektorami opartymi na technologii SOI. Wkład pracy własnej autora w tych rozdziałach jest bardzo duży.

W rozdziale trzecim, autor przedstawia wyniki dotyczące testów detektorów INTPIX6 opartych o technologię SOI a wykonanych we współpracy z laboratorium KEK w Japonii. Autor opisuje testy przy pomocy dwóch różnych źródeł radioaktywnych ^{241}Am i ^{55}Fe . Zmierzony poziom szumu pojedynczego piksela był na poziomie około $70e^-$, co jest wynikiem bardzo dobrym. Również liczba złych pixeli była bardzo niska. Już po napromieniowaniu dawką około 25 Krad detektor zaczął wykazywać oznaki pogorszenia warunków pracy. Maksymalna dawka napromieniowania wynosiła około 60 Krad, przy której detektor zaczął wykazywać znaczące pogorszenie tak poziomu szumu, wydajności jak i spektrum w przypadku źródła ^{55}Fe (rysunek 3.17). Bardzo imponująco wyglądają struktury sfotografowane przez detektor w podrozdziale 3.8. Jest tam również porównanie obrazu tych samych struktur w detektorach napromieniowanych. Zastanawia mnie czy aby dla napromieniowanych detektorów nie należało by zmienić algorytmów "zero suppression" i klasteryzacji? Brakuje mi tutaj dyskusji na ten temat. Jeżeli chodzi o pomiar spektrum energetycznego, być może należało by pozwolić na dłuższą akumulację statystyki, kompensując spadek wydajności, aby można wprost porównać cechy rozkładów energetycznych (jak rozdzielczość energetyczna). Być może w pracy powinny się też znaleźć wartości numeryczne opisujące spadek wydajności, rozumiem że można to oszacować z intensywności źródła. Opis zestawu pomiarowego, w szczególności płytki DAQ SEABAS, ze względu na rozmiary pracy nie może być zbyt dokładny ale powinien jednak zawierać odwołania do bibliografii opisującej schemat odczytu (np. IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 55, No. 3, 1631-1637, 2008) Chciałbym pochwalić opis selekcji i analizy przypadków opisanych w podrozdziale 3.3. Jest on pełny i odpowiada na pytania które mogą się tutaj pojawić. Opis procedury kalibracyjnej, być może standardowy, jednak jest pełny. Widać bardzo dobre zrozumienie i przygotowanie autora. Podkreślę również, co jest zaznaczone w pracy, że pan Bugiel jest autorem oprogramowania odczytu i analizy użytego w tej pracy.

W rozdziale czwartym, na ponad 30 stronach, opisana jest analiza prototypowych struktur (małych detektorów mozaikowych) SOI, zaprojektowanych przez grupę z AGH i wykonanych w tej samej technologii Lapis 200 co detektor z poprzedniego rozdziału. Prawdopodobnie w Japonii w tej samej fabryce niestety nie znalazłem wprost takiego stwierdzenia w pracy. Autor zaprojektował między innymi układ odczytu do trzech macierzy mozaikowych zaimplementowanych w układzie testowym. Pan Bugiel analizował charakterystyki jednej z tych macierzy (tzw. M1). Która sama w sobie ma skomplikowaną strukturę pozwalającą testować różne zaimplementowane technologie, rozrysowane na rysunku 4.2. Trzy różne implementacje pikseli, różniące się wielkością jak i sposobem odczytu, oraz różne podłoża (standardowe SOI oraz tzw. Double SOI). Opisano cały układ pikseli, układu resetującego, jak i wzmacniaczy.

Autor wykonał także symulacje zaprojektowanego przez siebie układu i opisał je w tym rozdziale. Całość opisu wskazuje na bardzo dobre przygotowanie pana Bugiela do projektowania detektorów krzemowych. Pan Bugiel przygotował również system akwizycji danych opisany w pracy, gdzie znowu brakuje odwołań do literatury, zresztą autorstwa doktoranta. Autor opisuje problemy jakie napotkał przy interpretacji wyników z macierzy o dużych pikselach z CPA. Co spowodowało że użyto tylko dwóch typów pikseli do ewaluacji elektroniki układu testowego jak i dwóch typów substratu.

Szczególną zaletą tych detektorów jest uzyskana rozdzielczość $2,1\mu\text{m}$ przy rozmiarach piksela $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$. Przeprowadzono również badania wrażliwości struktury na promieniowanie. Rozdział ten jest w szczególności ciekawy bo grupa testowała różne rozwiązania pozwalające na lepsze zachowanie detektorów po napromieniowaniu. Rozumiem że konkluzje nie są jeszcze ostateczne, jednak brakuje mi to sumarycznego zestawienia już zrozumianych efektów. Jest to o tyle istotne że technologia ta, jak zauważa

kilkukrotnie autor, jest mało odporna na zniszczenia radiacyjne. Każde rozwiązanie zmniejszające tę słabość, takie jak inny substrat, jest istotne dla zrozumienia w jakim kierunku pójdzie zastosowanie tej technologii w fizyce wysokich energii.

Rozdział 5 opisuje testy prototypowego detektora przeznaczonego do eksperymentów na przyszłym, potencjalnym, zderzacz e^+e^- CLIC. Główna zaleta monolitycznych detektorów krzemowych, które można ścieniać, więc mogą spełniać wyżyłowane warunki jeżeli chodzi o budżet materiałowy jest bardzo ważna. Dodatkowo wymagana jest dobra rozdzielczość przestrzenna które detektory mozaikowe potrafią dostarczyć. Grupa przygotowała prototyp detektora mozaikowego dostosowanego do wymagań CLIC. Prototyp posiada trzy matryce, gdzie ich rola sprowadza się głównie o przetestowanie rozwiązań z małymi pikselami. Autor był tutaj zaangażowany na poziomie projektowania oraz symulacji detektora. Niestety, jak rozumiem, układ odczytu DAQ jest dopiero rozwijany więc wyniki pomiarów tego układu nie zostały dołączone rozprawy. Mogę powtórzyć moja opinię z poprzedniego rozdziału, wkład merytoryczny autora jest tu duży. Jako zarzut mogę tylko dodać że muszę się domyślać jaka część pracy została wykonana przez autora a jaka jest pracą reszty grupy. Rozumiem jednak że dodanie tej części do pracy wskazuje jednak na docenienie roli autora przez grupę.

W konkluzjach spędziłbym więcej czasu na omówienie wyników związanych ze szkodami radiacyjnymi.

Praca wyróżnia bardzo dobrą redakcją, poza naprawdę drobnymi wpadkami. To czego mi brakuje w tej pracy to fakt że autor bardzo oszczędnie wykorzystuje cytowania. Autor rzadko się chwali wprost która część pracy wykonał osobiście, czasami trzeba się domyślać i ekstrapolować z innych rozdziałów. Sformułowanie wprost znajduje się dopiero w konkluzjach.

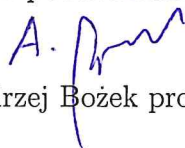
Rozprawa doktorska dowodzi, że autor zdobył duże doświadczenie w operowaniu warsztatem doświadczalnym oraz teoretycznym dziedziny. Pomimo że układ pracy nie pozwala na popisanie się szeroką wiedzą z zakresu fizyki detektorów, widać dogłębne zrozumienie tematu. Pan Bugiel jest współautorem 24 publikacji, not konferencyjnych oraz raportów. Jestem też pod wrażeniem nakładu pracy jaki był konieczny aby przeprowadzić tak rozległe pomiary. Praca została napisana zrozumiałym i bardzo poprawnym językiem angielskim.

Za najważniejszą cechę tej pracy uważam dogłębny przegląd pomiarów ale także symulacji dla monolitycznych detektorów wykonanych w technologii SOI. Pan Bugiel wykazał się zrozumieniem użytych technologii i wykazał potencjał SOI zarówno dla eksperymentów fizyki wysokich energii, dla zastosowań technologicznych, jak i dla obrazowania biologicznego. Ważną cechą pracy pana Bugiela jest to przeglądowa praca na temat technologii SOI, stąd moje narzekanie na niedostateczną listę cytowań.

W konkluzji stwierdzam, że przedłożona praca spełnia wszelkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie pana mgr inż. Szymona Bugiela do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wnioskuje również o wyróżnienie pracy doktorskiej uważam że przedstawione w rozprawie prace rozwojowe mają duże znaczenie w rozwój dziedziny. Z pracy wnioskuję że osobisty wkład doktoranta jest duży i istotny dla przedstawionych wyników. Publikacje oraz przyczynki konferencyjne których pan Bugiel jest autorem wskazują że jest to ciekawy kierunek rozwoju, który może jeszcze nie owocował gotowymi zastosowaniami w fizyce wysokich energii, jednak w przyszłości może być ważna technologia. Autor tej rozprawy jest już specjalistą w tej dziedzinie.

z poważaniem



dr hab Andrzej Bożek prof. IFJ PAN

