



Prof. dr hab. Piotr Salabura

Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego

ul. Prof. Łojasiewicza 11

Uniwersytet Jagielloński

30-348 Kraków

12.10. 2019

Kraków

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Szymona Bugiela „Development of monolithic pixel detectors”

Praca doktorska pana mgr inż. Szymona Bugiela „Development of monolithic pixel detectors” dotyczy fizyki i elektroniki odczytu detektorów krzemowych. Monolityczne detektory krzemowe są według mojej oceny jednym z najciekawszych obecnie kierunków rozwoju w technikach detekcyjnych. Ich ogólna koncepcja sprowadza się do pełnej integracji elektroniki odczytu z warstwą detekcyjną detektora krzemowego bez konieczności łączenia obu, zwyczajowo wykonywanych w odrębnych warstwach krzemu. Olbrzymią zaletą tej techniki jest możliwość uzyskania detektora o bardzo małej grubości radiacyjnej (ułamków procenta). Imponującymi przykładami realizacji monolitycznych detektorów krzemowych o dużej skali są na przykład obecnie montowane detektory ITS2 w eksperymencie ALICE oparte na układzie scalonym ALPIDE służących do rekonstrukcji wierzchołka interakcji z około  $10^6$  elementów czułych (pikseli) o wymiarach  $30 \times 30 \mu\text{m}$ .

Praca mgr inż. Bugiela poświęcona jest badaniom detektorów wykonanych w technologii SOI (Silicon-On-Insulator) (200 nm) japońskiej firmy Lapis Semiconductor w której warstwa implementacji elektroniki odczytu jest rozdzielona od wysokooporowej warstwy detekcyjnej cienką warstwą izolatora. Praca składa się z dwóch głównych części; pierwszej poświęconej pomiarom charakterystyki działania prototypu układu INTPIX6, wykonanego przez grupę japońską z KEK, oraz drugiej przedstawiającej projekt oraz testy nowego autorskiego układu

o ogólnym zastosowaniu dla eksperymentów HEP. W ostatnim rozdziale pracy zawarto także opis architektury znacznie bardziej złożonego układu CLIPS zaprojektowanego dla przyszłego liniowego zderzacza (CLIC) i czerpiącego z doświadczeń uzyskanych w poprzednich projektach. Materiał badawczy zawarty w pracy jest więc bardzo bogaty i interesujący zwłaszcza w kontekście wspomnianego powyżej nowatorskiego charakteru. Autor pracy prezentuje czytelny opis architektury badanych układów scalonych, z wyszczególnieniem elementów wykonanych samodzielnie oraz opis metod pomiarowych wykonanych do określenia ich charakterystyki. Przedstawione w pracy wyniki pomiarów, głównie wykonane przy pomocy źródeł promieniowania X, charakteryzują dobrze jakość działania i są poddane zostały rzetelnej analizie ze szczególnym podkreśleniem zauważonych mankamentów.

Praca składa się 5 rozdziałów oraz dodatku. Jest napisana po angielsku w sposób staranny i czytelny i jest bogato ilustrowana uzyskanymi wynikami pomiarów.

Rozdział pierwszy przedstawia dydaktyczny wstęp do fizyki detektorów krzemowych, technologii detektorów monolitycznych CMOS oraz fizyki oddziaływania cząstek jonizujących z materią. Rozdział drugi prezentuje przegląd stosowanych technologii SOI, opis procesów służących do produkcji warstw, w tym technologii Lapis w której wykonano badane elementy detekcyjne oraz ich odporności na jonizację. Ten ostatni element jest szczególnie krytyczny dla zastosowań w eksperymentach akceleratorowych (HEP) i zależy od całkowitej dawki promieniowania oraz w sposób istotny od struktury układu. W tym kontekście szczególnie dobrym wydają się być struktury DSOI (Double SOI), w których warstwa izolatora jest rozdzielona przez dodatkową przewodzącą warstwę krzemu, prowadzącą do lepszego kompensowania uwięzionych ładunków. Cytowane w pracy publikowane wyniki dla takiej konfiguracji wskazują duże wartości dawki pochłoniętej 500 kGy przy których układy nie wykazują efektów starzenia. W związku z powyższym, do dalszych badań wybrano dwa różne typy konfiguracji: właśnie typu DSOI(p) oraz tzw. Floating Zone (FZ(n)) o dużej oporności warstwy detekcyjnej (2 kΩcm).

Rozdział 3 przedstawia najważniejsze wyniki badań układu INTPIX6 typu FZ oraz CZ składającego się z 11 macierzy, 128x896 pikseli (12μm x 12μm) każda, odczytywanych równolegle, z których zdeponowany ładunek w pikselach jest całkowany, wzmacniany i zapamiętywany w układzie store-and-hold a następnie przekazywany przez układ adresujący do odrębnej karty z układem cyfrowym. Karta odczytu SEABAS, dostarczona przez grupę z KEK, zawierała 12-bitowy ADC, kanały transmisji danych oparte na TCP/IP i kontroli układu INTPIX6 zaimplementowane w układach FPGA. Doktorant wykonał oprogramowanie służące do analizy oparte na środowisku ROOT oraz przeprowadził szereg pomiarów przy pomocy

źródeł radioaktywnych. Pomiary przeprowadzono dla zredukowanego obszaru 256x256 pikseli przy użyciu źródeł X ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ) z całkowitą dawką do 60 kRad. Zaprezentowane widma po odjęciu piedestałów, kalibracji i klasteryzacji wskazują na istotny rozrzut wzmocnień dla pikseli (rysunki 3.7 oraz 3.8), który poprawiono przez dodatkową kalibrację zależną od pozycji piksela. Rozrzut wzmocnień wyjaśniono poprzez prąd upływu który zależy od czasu oczekiwania na odczyt a więc od pozycji piksela. Po przeprowadzeniu pełnej kalibracji układ cechuje się dobrą liniowością (rysunek 3.13), małą wartością szumów ekwiwalentną (ENC) około 70e- (wyznaczonych z szerokości piedestałów) oraz około 110 e- wyznaczona z szerokości linii 5.9 keV  $^{55}\text{Fe}$  (rysunek 3.14). Widma uzyskane z  $^{55}\text{Fe}$ , dostarczającego mono-energetyczną linię X o energii 5.9 keV, charakteryzują się asymetrycznym rozkładem o znacznym ogonie po stronie mniejszych energii (np. rysunek 3.14), którego pochodzenie nie jest skomentowane w pracy. Nasuwa się także pytanie o interpretację różnych wartości ENC, wspomniane powyżej. W ostatniej części rozdziału zbadano odporność na zniszczenia radiacyjne wyznaczając wartość maksymalną dawki pochłoniętej (wzory 3.5-3.8) przez warstwę izolacyjną na 25 krad przy której nie obserwuje się jeszcze niepożądanych efektów (wzrost szumów, prądów upływu, pogorszenie rozdzielczości). Czytając oszacowanie dawki a w szczególności liczby pochłoniętych fotonów nasuwa się pytanie czy w oszacowaniu nie należałoby uwzględnić ewentualnego efektu pochodzącego od czasu martwego wynikającego z czasu integracji (około 10  $\mu\text{s}$ ?). Uzyskana wartość dawki jest stosunkowo niska dla typowych wymagań detektorów w eksperymentach akceleratorowych. W związku z powyższym dla potrzeb takich eksperymentów wykonano nowy układu przedstawiony w rozdziale 4 pracy.

W rozdziale 4 autor pracy przedstawia projekt oraz testy jednej z trzech macierzy (M1) pikselowych różniących się technikami odczytu zaimplementowanych w wyprodukowanym układzie scalonym. Macierz M1, zaprojektowana przez doktoranta, składa się z dwóch alternatywnych rozwiązań odczytu: wtórnika źródłowego (SF) oraz wzmacniacza ładunkowo czułego (CPA), z dwoma możliwymi wartościami wzmocnienia, zaimplementowanego dla 2 różnych wielkości pikseli (5 x 5  $\mu\text{m}$ ) oraz (29x 29  $\mu\text{m}$ ) wykonanych w technologiach FZ oraz DSOI. Oba rozwiązania mają ten sam system odczytu składający się z dodatkowego wzmacniacza obsługującego całą kolumnę pikseli oraz wspólnego wzmacniacza (bufora wyjściowego) dostarczającego w pełni różnicowego sygnału wyjściowego. Rozdział 4.1 przedstawia szczegółowy opis architektury obu wzmacniaczy SF i CPA, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowanej realizacji małych pojemności w sprzężeniu zwrotnym CPA (~1 fF) oraz wzmacniacza kolumny. Zaletą CPA jest niezależność od pojemności wejściowej. W rozdziale 4.2 opisane są wyniki symulacji przeprowadzonych przy pomocy modelu elementów dostarczonego przez Lapis. Rozdział 4.3 przedstawia dedykowany cyfrowy układ

odczytu oparty na płycie deweloperskiej Genesys Virtex-5 z logiką FPGA oraz opis dwóch dedykowanych płyt wykonanych przez grupę z AGH sterujących i zasilających macierze pikseli z 12 bitowym konwerterem ADC oraz służących do montażu macierzy. Autor pracy wykonał oprogramowanie DAQ oraz systemu analizy danych oparty na środowisku ROOT. Wyniki pomiarów testowych zostały przedstawione w rozdziale 4.4. Najważniejsze uzyskane wyniki to: (i) charakterystyki prądowo napięciowe (rysunki 4.15) wskazujące, dla macierzy DSOI, na nieoczekiwany wzrost prądu upływu poniżej uzyskania pełnej grubości warstwy zubożenia przy jednoczesnej obserwacji stabilnej linii bazowej i braku wzrostu jej szumów ale znacznym pogorszeniu zdolności rozdzielczej (rys. 4.17) (ii) wyznaczenie wartości wzmocnienia układu oraz pojemności wejściowej (dla SF) i pętlowej (dla CPA) – tabele 4.3, 4.4 – i ich porównanie z wartościami z symulacji (iii) uzyskanej dobrej liniowości dla wszystkich badanych architektur (iv) wyznaczenie zdolności rozdzielczej energetycznej i wartości ENC (tabele 4.5-4.6) oraz (v) rozdzielczości pozycyjnej (wyznaczonej w odrębnym pomiarze przy użyciu wiązki pionów w CERN). Stwierdzono, zgodnie z oczekiwaniami, znacznie gorszą energetyczną zdolność rozdzielczą dla architektury SF dla DSOI niż dla CPA z powodu większej pojemności wejściowej (rysunek 4.18/4.19 – uwaga: czy w podpisie uzyskanych wyników prawidłowe jest podanie że widma zostały uzyskane dla INPIX6?) z silną zależnością od rodzaju technologii (SF vs DSOI). Architektura CPA jest znacznie lepsza dla DSOI (porównanie widm z 4.18 B/C z 4.19 B/C oraz charakterystyk -rys. 4.20) co jest zastanawiające ze względu na oczekiwaną zależność wzmocnienia tylko od pojemności pętlowej która powinna być, jak wskazuje autor, niezależna od technologii. W porównaniu uzyskanych wartości wzmocnień i pojemności z wartościami z symulacji są rozbieżności które autor stara się wyjaśnić sensownym szacowaniem pojemności pasożytniczych wynikających ze sprzężenia pomiędzy elektroniką odczytu z warstwą sensora, które nie są uwzględnione w modelu symulacyjnym. Generalnie odnosi się wrażenie że model symulacyjny producenta nie oddaje prawidłowo wszystkich cech technologii. Wyznaczone wartości ENC (tabela 4.6) są niższe dla architektury SF w technologii FZ(n) (o około 20-40 e), ale na te ostatnie wydają się wpływać także odczyt (mniejsze szумы dla większego wzmocnienia wzmocniacza kolumn). Sytuacja jest odwrotna dla DSOI gdzie wartości szumów wyznaczone z pomiaru piedestałów pozostają bez zmian ale pogarszają się dla SF w DSOI. Stały poziom szumów wyznaczony dla CPA jest zastanawiający w kontekście widocznej różnej zdolności rozdzielczej uzyskanej z pomiarami przy pomocy źródeł widocznej (rys. 4.18 B/C z 4.19 B/C). Analizę własności detektorów zamyka pomiar zdolności rozdzielczych, wykonanych przez innych członków grupy, które zostały określone na około 2-3  $\mu\text{m}$  dla FZ 5  $\mu\text{m}$  dla DSOI z prawdopodobnie z powodu wspomnianej niemożliwości osiągnięcia pełnej warstwy zubożenia. Przedstawione wyniki w pełni

charakteryzują układ choć z mojego punktu widzenia interesujące byłyby jeszcze pomiary odporności na radiację.

Praca jest zamknięta rozdziałem 6 opisującym architekturę bardziej złożonego układu CLIPS, ostatnio wykonanego przez grupę z AGH, w którego projekcie autor brał udział . Opisane zostały główne elementy układu: macierz pikselowa ( $20 \times 20 \mu\text{m}$ ), wzmacniacz ładunkowo czuły, dyskryminator, układ do pomiaru czasu (z precyzją do kilkunastu ns) , stopnia wyjściowego oraz układu odczytu. Opis układu jest uzupełniony wynikami symulacji głównych parametrów układu . Testy układu zostały rozpoczęte ale ich wyniki nie zostały jeszcze zamieszczone w pracy

Podsumowując, stwierdzam iż przedstawiona do recenzji praca mgr inż. Szymona Bugiela „Development of monolithic pixel detectors” w pełni spełnia warunki ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, dlatego też wnoszę do rady wydziału WFiIS AGH o dopuszczenie mgr inż. Bugiela do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. dr hab.

Piotr Salabura

