

dr hab. Zbigniew Sosin ,

Kraków, dnia 27 kwietnia 2015 roku.

Instytut Fizyki,

Uniwersytet Jagielloński,

30-059 Kraków, ul. Reymonta 4

## RECENZJA

### *pracy doktorskiej*

pt.: „**Zastosowanie submikronowych technologii VLSI w rozwoju wielokanałowych układów scalonych do odczytu detektorów cząstek jonizujących**”

Autor pracy: Pan mgr inż. **Dominik Przyborowski**

Przedstawiona do recenzji praca pana mgr inż. Dominika Przyborowskiego, wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Marka Idzika, dotyczy jednego z najważniejszych a zarazem najciekawszych eksperymentów, których realizację zaproponowano do wykonania na nowobudowanych urządzeniach dla badań prowadzonych przez fizyków jądrowych. Chodzi tu mianowicie o projektowany przez kolaborację PANDA eksperyment, który jest przygotowywany do realizacji w nowym centrum akceleratorowym FAIR w Darmstadt. Celem tego projektu jest zbadanie relacji masowych (oraz sposobu generacji masy) podczas reakcji, które punktowo generują wysokie gęstości energii. Dla uzyskania tego celu postanowiono posłużyć się antyprotonami, które jako cząstki antimaterii, wyzwalają w zderzeniu z protonem dużą ilość energii w bardzo małej objętości. Energia ta powinna pozwolić na wytworzenie dużej liczby różnego rodzaju cząstek i antycząstek.

Cząstki wytworzone w opisany powyżej sposób będą charakteryzować się bardzo krótkim czasem życia przez co bezpośrednia ich detekcja jest niemożliwa. Dla eksperymentatorów dostępne będą jedynie cząstki wtórne pochodzące z rozpadów wytworzonych obiektów. Drugim istotnym utrudnieniem jest brak znajomości na jakie fragmenty będą rozpadać się wytworzone, obdarzone masą produkty (np. glueballe). Dlatego detektor PANDA powinien umożliwić rejestrować i identyfikować cząstki z możliwie najszerszego zakresu mas i pędów. Dodatkowo, spodziewane małe prawdopodobieństwa związane z niektórymi kanałami reakcji wymagają stosowania dużych intensywności wiązki jak i użycia stosunkowo grubych tarcz. W konsekwencji stosowane w eksperymencie detektory i obsługująca je elektronika musi charakteryzować się odpowiednio dużą szybkością działania, odpornością na uszkodzenia radiacyjne a zarazem posiadać możliwie niski poziom szumów.

Przedstawiona praca, poświęcona jest głównie projektowaniu i testowaniu układów elektronicznych. Składa się ze wstępu, trzech rozdziałów oraz podsumowania, bogatej bibliografii, spisu rysunków i spisu tabel.

W krótkim wstępie autor przedstawia cel fizyczny stawiany przed detektorem PANDA oraz omawia wymagane parametry techniczne niezbędne dla osiągnięcia stawianych przed eksperymentem zadań. Wydaje się, że cel fizyczny omówiony jest tu dość pobieżnie, co może być usprawiedliwione poprzez skupienie się autora na szczegółowym omówieniu budowanej elektroniki pomiarowej. W dalszej części wstępu została w zwięzły sposób przedstawiona zawartość pracy.

Pierwszy rozdział pracy, zawiera pięć podrozdziałów i przedstawia własności współczesnych technologii CMOS, przy czym ze względu na ograniczenia związane z parametrami fizycznymi autor

koncentruje się na technologiach posługujących się długościami kanału 350 i 130 nanometrów. Zmniejszenie długości kanału (granica jest tu około 14 nanometrów) powoduje odejście od optymalnych parametrów układu. W pierwszej części 1 rozdziału autor omawia sposoby implementacji w strukturze układu scalonego takich elementów jak oporniki, kondensatory, cewki oraz tranzystory bipolarne. Następnie w podrozdziale 1.2 przedstawione zostały sposoby modelowania charakterystyk tranzystorów CMOS, przy szczegółowym rozważeniu efektu krótkiego kanału. W dalszej kolejności autor rozważa własności wieloparametrycznych modeli tranzystora, ich kolejne udoskonalenia oraz możliwość zastosowania tych modeli do opisu podstawowych charakterystyk tranzystora. Podrozdział trzeci poświęcony jest określeniu źródeł szumów występujących w układach elektronicznych wykonanych w technologii CMOS oraz czynników wpływających na ich wielkość, co ma zasadnicze znaczenie podczas projektowania odpowiednich układów. Jak wiadomo propagacja szybkich sygnałów wymaga by przy ich transmisji spełnione były warunki dopasowania. W 4 podrozdziale autor dyskutuje systematyczne i statystyczne efekty (związane z fluktuacjami stowarzyszonymi z procesami domieszkowania i fotolitografii), które wywołują brak dopasowania. Przeprowadzono też analizę efektów, które mogą być skutkiem braku dopasowania. Na końcu rozdziału 1 porównano wzmocnienia i częstotliwości graniczne uzyskane dla układów wykonanych w technologii z długością kanału odpowiednio 350 i 130 nm. Autor pokazał, że tranzystory wykonane w starszej technologii (kanał o długości 350 nanometrów) charakteryzują się o rząd większym wzmocnieniem, natomiast dla nowszej technologii częstotliwości graniczne są kilka razy większe, co umożliwia budowę szybszych układów.

Drugi rozdział pracy opisuje elektronikę odczytu monitora wiązki. Monitor ten ma dostarczać informacji na temat świetlności wiązki, tła z nią związanego, jak również mierzyć straty wiązki. Dlatego monitor zbudowany został w formie dwu podsystemów: pierwszy realizowany w oparciu o szybką elektronikę monitoruje świetlność oraz szybkie zmiany parametrów. Drugi podsystem, poprzez integrację prądu sensora monitoruje straty wiązki.

Sensory użyte do budowy omawianego monitora stanowi 25 detektorów diamentowych (wykonane techniką *Crystal Chemical Vapor Deposition*) z dwoma elektrodami sygnałowymi każdy co daje w sumie 48 kanałów odczytu.

W torze pomiarowym, związanym z każdym z kanałów można wymienić następujące elementy:

Sensor-detektor diamentowy; przedwzmacniacza transimpedancyjnego z aktywnym sprzężeniem zwrotnym, układu kształtującego i konwertera sygnału niesymetrycznego na różnicowy. W prezentowanym projekcie przed nowym układem elektroniki FRONT-END postawiono wysokie wymagania co do takich parametrów jak np. czułość układu, jego szybkości (w stara wersja okazuje się tu być zbyt wolna), szerokości impulsów i stosunek sygnał/szum. Aby temu podołać zaprojektowano przedwzmacniacz o zwiększonym wzmocnieniu i większej transkonduktancji. Ten element toru pomiarowego determinuje szybkość oraz szumy omawianego toru pomiarowego. Dlatego też autor przedstawia pogłębioną analizę częstotliwościową ilustrowaną odpowiednimi charakterystykami wraz z omówieniem roli pojawiających się biegunów i zer. W dalszej części rozdziału przedstawiona została mało-sygnałowa analiza pracy przedwzmacniacza transimpedancyjnego co umożliwia określenie wpływu zastosowanych elementów na czas narastania i czas opadania impulsu. Następnymi elementem toru pomiarowego są stopnie kształtujące wraz z buforami różnicowymi, dla których również przeprowadzono analizę małosygnałową. W dalszej kolejności autor przedstawia wyniki przeprowadzonych symulacji tak dla poszczególnych części toru pomiarowego jak i dla pełnego kanału pomiarowego. Wyniki symulacji dotyczą między innymi charakterystyk częstotliwościowych uzyskanych dla różnych wartości pojemności sensora, impedancji wejściowej jak i parametrów czasowych impulsu odpowiedzi na wymuszenie Dirac-owskie. Na końcu rozdziału drugiego, w podrozdziale zatytułowanym „Parametryzacja prototypu”, przedstawione zostały parametry zbudowanego układu. Parametry czasowe szumowe oraz liniowość układu dobrze zgadzają się z parametrami otrzymanymi w symulacji układu oraz spełniają postawione w stosunku do nich wymagania. Na rysunku 2.35 przedstawiono typowy

impuls zarejestrowany przez system detekcyjny. Kształt tego rysunku rodzi pytanie dotyczące zdolności rozdzielczej zastosowanego przetwornika. Zastosowany 8 bitowy przetwornik powoduje dyskretne fluktuacje linii bazowej. W przypadku dużego obciążenia detektora może się też okazać, że dodatkowe błędy pomiarowe mogą być wynikiem przekrywania się impulsów. Takie przypadki pewnie można analizować poprzez parametryzację kształtu impulsu i przypisanie im odpowiednich czasów przyścia i amplitud. Wydaje się jednak, że w tym celu należałoby zastosować przetwornik o wyższej rozdzielczości bitowej.

Ostatni rozdział poświęcony jest elektronice stowarzyszonej z detektorami słomkowymi. Detektory słomkowe, jako detektory pozycyjne, wykorzystywane są do wyznaczenia śladów cząstek dla zderzeń centralnych jak i w przypadku cząstek poruszających się „do przodu”. Stosowane tu podukłady są częściowo podobne do stosowanych w monitorze wiązki. Ze względu na specyfikę pomiaru pojawiają się tu pewne różnice w stosowanych metodach. Wynikają one głównie z:

- 1) z pojawienia się w mierzonym impulsie długiego ogona związanego z ładunkiem jonowym,
- 2) bardzo duża liczba kanałów odczytu (około 14700), praktycznie uniemożliwiająca zastosowanie przetworników Flash-Adc (koszty), które przy częstotliwości odczytu 3 MHz byłyby w stanie obsłużyć zarówno pomiary amplitudowe jak i czasowe (oraz w razie potrzeby wyznaczenie fluktuacji linii bazowej). Dlatego, aby określić energetyczną i czasową zdolność rozdzielczą toru pomiarowego posłużono się badaniem korelacji widma czasu dryfu elektronów oraz czasu ich dryfu nad progiem. Pełnej analizy dokonał tu mgr inż. Paweł Biernat z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- 3) wybrana metoda pomiaru czasu dla uzyskania odpowiedniej precyzji wymaga małych fluktuacji linii bazowej co realizuje dodatkowa część elektroniki.

Tak zmodyfikowany układ musi spełniać następujące wymagania:

- a) detektor pojemnościowy, którego pojemność może sięgać 25 pF a szumy układu nie powinny przekraczać 6000 e.
- b) pierwszy stopień kształtujący dla generacji gauso-podobnego impulsu o czasie kształtowania 10\_40ns zawiera układ PZC przyczyniający się do eliminacji długiego ogona.
- c) dodatkowy układ eliminacji ogona generowanego w detektorze przez składową ciężkojonową. Zastosowano tu specjalizowane układy, które pozwalają na zdalną regulację odpowiednich stałych czasowych, stosownie do zastosowanych mieszanek gazowych. Układy kształtowania powinny zapewnić pracę z częstotnością zliczeń dochodzącą do 3MHz.
- d) układ stabilizacji linii bazowej (BLH), który ma za zadanie zmniejszyć fluktuacje pomiaru czasu przyścia cząstki wraz z dyskryminatorem poziomu musi zapewnić rozdzielczość czasową na poziomie poniżej 1 ns.

Przedstawiony w rozdziale drugim opis przebiega podobnie do opisu elektroniki monitora wiązki. Autor najpierw przedstawia architekturę elektroniki front-end. Następnie przeprowadza symulację tak poszczególnych części jej toru jak i jej całości, by w rozdziale zatytułowanym „parametryzacja prototypu” podsumować otrzymane wyniki.

W rozważanym przypadku zbudowane zostały dwie wersje układów, które były stopniowo udoskonalane. Pierwszy prototyp układu posłużył jedynie dla wstępnych testów, gdyż jak się okazało posiadał pewne wady, które zostały poprawione w następnej wersji elektroniki. Kolejne rozwiązanie, które przedstawiono, spełniają stawiane układowi wymagania dotyczące czułości układu parametrów czasowych impulsu, szumów własnych układu czy też czasowej zdolności rozdzielczej.

**Podsumowanie:** Przedstawiona praca do recenzji stanowi wartościowy opis prac związanych z projektowaniem elektroniki obsługującej wybrane detektory eksperymentu PANDA. Funkcjonalność i zadania realizowane przez poszczególne podukłady są dobrze przemyślane a opis wzbogacony został o

szereg tak cząstkowych jak i globalnych analiz, symulacji i wykresów. Pomimo, że tak duże przedsięwzięcia eksperymentalne stanowią zwykle pracę zbiorową to w przypadku prezentowanej pracy jej ważne części opracowane zostały w dużej części przez autora. Odnosi się to zarówno do konstrukcji monitora wiązki jak i elektroniki dedykowanej detektorom słomkowym.

Podczas recenzji zauważono drobne błędy związane głównie w wadliwym doborze czcionek dla opisu wielkości fizycznych. Nie jest intencją recenzenta by je tu prezentować. Takich błędów zauważono w sumie kilka a ich spis dołączono na ostatniej stronie recenzji co umożliwi autorowi ewentualną korektę pracy.

Natomiast chciałbym się krótko odnieść do przeprowadzonych obliczeń i symulacji. Stanowią ona bardzo ważną część pracy. W przypadku obliczenia parametrów układu (jak np. wzmocnienia czy szumy) wyprowadzone formuły zupełnie wystarczają do przedstawionego opisu. Natomiast w przypadku złożonych symulacji, umożliwiających śledzenie szczegółów omawianych przebiegów, czytelnik chciałby mieć możliwość zapoznania się ze szczegółami tych symulacji. Czy symulacje te zostały napisane przez autora pracy, czy też są częścią pakietów obliczeniowych. A jeśli tak to jakich?

Pomimo tych uwag wysoko oceniam przedstawioną pracę i proponuje przyznanie jej odpowiedniej nagrody. Stwierdzam też, że recenzowana praca Pana mgr inż. **Dominika Przyborowskiego** doktoranta Prof. dr hab. inż. **Marka Idzika** pt. „**Zastosowanie submikronowych technologii VLSI w rozwoju wielokanałowych układów scalonych do odczytu detektorów cząstek jonizujących**” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy i wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie jej autora do publicznej obrony.

Zauważone błędnie użyte czcionki:

Str 18, 14 wiersz od dołu

Str 19, 4 wiersz od góry

Str 19, 10 wiersz od góry

Str 22, 5 wiersz od góry

Str 36, 4 wiersz od góry