

Kraków, 1 września 2015 rok.

Prof. dr hab. Jerzy Smyrski
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Jagielloński

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Moronia pt. „Development of novel low-power, submicron CMOS technology based, readout system for luminosity detector in future linear collider”

Plany rozwoju badań fizyki wysokich energii przewidują budowę zderzacza liniowego e+e-, który dzięki niskiemu tłu eksperymentalnemu oraz dobrze określonej kinematyce zderzeń, umożliwi precyzyjne pomiary własności bozonu Higgsa, dokładne testy Modelu Standardowego oraz wysokiej czułości poszukiwania cząstek spoza tego modelu. Prowadzone są prace rozwojowe nad dwoma tego typu projektami: Międzynarodowym Zderzaczem Liniowym ILC oraz Kompaktowym Zderzaczem Liniowym CLIC w CERN-ie. Dla wymaganej precyzyjnej rekonstrukcji energii i torów cząstek w planowanych eksperymentach na zderzaczach liniowych konieczny jest rozwój detektorów o bardzo wysokiej segmentacji, z czym wiąże się wymóg minimalizacji poboru mocy elektroniki odczytu oraz konieczność przyspieszenia przetwarzania impulsów i transmisji danych.

Grupa badawcza z Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, do której należy pan mgr. inż. Jakub Moroń, prowadzi prace nad detektorem LumiCal w ramach międzynarodowego zespołu FCAL. Przedmiotem prac grupy z AGH stał się projekt elektroniki odczytu do LumiCal. Przygotowano pierwszą wersję elektroniki zawierającą układy front-endu oraz 10-bitowego ADC zrealizowane w technologii AMS 350 nm. W ramach przygotowania pracy doktorskiej pan Moroń przeprowadził testy prototypu LumiCal wyposażonego w tą elektronikę z wykorzystaniem wiązki elektronów o energii 5 GeV. Podjął się także zadania opracowania nowej wersji zarówno front-endu, jak i ADC w technologii CMOS 130 nm, wykorzystując szereg zalet tej technologii do poprawy kluczowych parametrów układu odczytu – m.in. zużycia mocy i odporności na promieniowanie.

Rozprawa składa się z trzech rozdziałów opatrzonych abstraktem i podsumowaniem oraz z dwóch dodatków zawierających widma z przeprowadzonych testów.

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do tematyki pracy zaczynając od przedstawienia ogólnych zagadnień dotyczących motywacji i programu badań planowanych na zderzaczach liniowych, poprzez opis projektów akceleratorów i układów detekcyjnych, aż do prezentacji detektora LumiCal i architektury elektroniki jego odczytu.

Do wyznaczania świelności w eksperymentach na zderzaczach liniowych wykorzystany zostanie koincydencyjny pomiar elastycznego rozpraszania elektron-pozyton pod małymi kątami. Posłuży do tego para detektorów LumiCal, będących próbkującymi kalorymetrami elektromagnetycznymi posiadającymi kształt cylindra z centralnym otworem na jonowód, umieszczonymi po przeciwnych stronach punktu oddziaływania w kierunku do przodu. Umożliwią one precyzyjny pomiar kąta rozproszenia i energii rozproszonych elektronów oraz pozytonów.

Do eksperymentów na ILC przy maksymalnej energii zderzenia 500 GeV, detektor LumiCal zawiera 30 warstw wolframowego absorbera o grubości 3.5 mm odpowiadającej ok. jednej długości radiacyjnej. W 1mm szczelinach pomiędzy płytami absorbera umieszczone są warstwy detektorów krzemowych o grubości 320 μm . Każda z nich składa się z 12 segmentów stanowiących wycinki pełnego kąta azymutalnego. Dla wymaganej precyzyjnej rekonstrukcji śladów elektronów i pozytonów, poprzez pomiar profili poprzecznych kaskad elektromagnetycznych, warstwy detektorów krzemowych podzielone są na pady w kształcie wycinków pierścienia o wymiarach w kierunku azymutalnym porównywalnych z promieniem Moliere'a wynoszącym dla materiału kalorymetru ok. 12 mm i o szerokości w kierunku radialnym kilkakrotnie mniejszej. W LumiCalu znajduje się 30 warstw detektorów krzemowych zawierających łącznie blisko 100 tys. padów. Każdy pad odczytywany jest indywidualnie przez elektronikę, która umieszczona jest na obwodzie detektora.

Zaproponowany tor odczytu LumiCała obejmuje układ front-endu ze wzmacniaczem i układem kształtującym, próbkujące ADC oraz układ cyfrowego przetwarzania sygnałów. Pierwsze prototypowe układy front-endu i ADC zaprojektowane i wykonane zostały jako specjalizowane układy scalone ASIC w technologii AMS 350 nm. Front-end zawiera wzmacniacz ładunkoczuły oraz układ kompensacji biegun-zero (PZC) i filtr typu CR-RC. Zakres dynamiczny front-endu wynoszący 6 pC pozwala na rejestrację maksymalnych oczekiwanych ładunków produkowanych w detektorze krzemowym przez kaskady elektromagnetyczne. Dla rejestracji cząstek w minimum jonizacji, przewidzianych do kalibracji detektora i pozostawiających średni ładunek wartości 4 fC, możliwe jest przełączenie wartości wzmocnienia wzmacniacza dla zwiększenia jego czułości. Czas osiągnięcia wartości szczytowej impulsów wyjściowych front-endu wynosi ok. 70 ns. Jeden ASIC front-endu zawiera 8 kanałów.

Próbkujący ADC zaprojektowany został jako 10 bitowy przetwornik typu potokowego z nominalną częstotliwością próbkowania 20 MHz i zużyciem mocy ok 16 mW na kanał.

Prototypowa 32-kanałowa płyta odczytu do LumiCała zawiera cztery układy front-endu i cztery ADC, a także układ FPGA służący do buforowania danych spływających z ADC strumieniem wynoszącym ok. 6.4 Gbps, wyzwala odczytu i przesyłania danych do zewnętrznego komputera typu PC z użyciem protokołu UART.

W rozdziale drugim przedstawione zostały testy układu prototypowego zawierającego cztery segmenty detektora krzemowego do LumiCała rozdzielone parami wolframowych absorberów. Dodatkowo, dla dokładniejszego prześledzenia rozwoju kaskad elektromagnetycznych, przetestowano trzy różne konfiguracje zawierające odpowiednio jeden, trzy i cztery absorbery umieszczone przed pierwszym modulem detektora krzemowego. Do rejestracji impulsów z 32 padów pokrywających obszar o powierzchni ok. 50 mm x 30 mm w każdym z czterech segmentów detektora krzemowego zastosowane zostały cztery płyty elektroniki odczytu.

Do testów wykorzystano wtórną wiązkę, wytwarzaną przez 24 GeV protony z akceleratora PS w CERNie, zawierającą oprócz m.in. pionów i mionów ok. 5% domieszkę elektronów. Do identyfikacji elektronów w wiązce posiadających pęd ok 5 GeV wykorzystano dwa gazowe liczniki Czerenkowa. Do wyzwala odczytu zastosowano koincydencję pomiędzy licznikami Czerenkowa i dwoma detektorami scyntylacyjnymi umieszczonymi jeden – przed, drugi – za układem testowym oraz anty-koincydencję z detektorem scyntylacyjnym posiadającym okrągły otwór o średnicy 9 mm umożliwiającą zawężenie obszaru rejestrowanego oddziaływania cząstek wiązki z układem testowym. Ponadto, do śledzenia torów cząstek wiązki wykorzystano teleskop składający się z czterech pikselowych detektorów typu MAPS -Mimosa26, każdy o powierzchni czynnej ok. $21 \times 10 \text{ mm}^2$.

W pierwszym kroku analizy zebranych danych wyznaczono poprawki do pozycji detektorów teleskopu wiązki. W tym celu przeprowadzono iteracyjną procedurę rekonstrukcji śladów z odrzuceniem sygnałów od szumów oraz wyznaczania poprawek do pozycji detektorów poprzez minimalizację funkcji będącej sumą wartości bezwzględnych różnic odchyłeń pomiędzy zmierzoną i zrekonstruowaną pozycją śladu. Szkoda trochę, że autor nie podaje wartości znalezionych poprawek do pozycji oraz informacji o tym jak szybko zbieżna jest procedura liczenia poprawek.

Analizę impulsów z testowanego detektora, zapisywanych dla każdego kanału w przypadku spełnienia warunku tryggera w postaci 32 próbek rejestrowanych z okresem 50 ns, rozpoczęto od korekty linii bazowej dla każdego kanału i zdarzenia wyliczonej jako średnia z pierwszych 13 próbek poprzedzających impuls od cząstek.

Następnie, dokonano redukcji zaburzeń linii bazowej pojawiających się w sposób skorelowany w różnych kanałach. Zrobiono to poprzez odjęcie od wartości danej próbki średniej z próbek dla grupy czterech kanałów w danym ASICu charakteryzujących się tym samym wzmocnieniem, z wyłączeniem kanałów, w których pojawiły się impulsy od cząstek. Fluktuacje linii bazowej zostały zredukowane dzięki temu o czynnik ok. 3.

Dla wyznaczenia amplitudy i momentu pojawienia się impulsu w serii próbek rejestrowanych w każdym kanale ADC, zastosowano filtr cyfrowy o skończonej odpowiedzi impulsowej. Zaletą tej metody jest możliwość jej prostej implementacji w FPGA na płycie odczytu co pozwoli w przyszłości na zredukowanie strumienia danych wysyłanych z płyty. Transmitancję filtra wyliczono uwzględniając typ CR-RC układu kształtującego we front-endlu. Odpowiedź filtra zawarta jest w dwóch niezerowych wartościach związanych w prosty sposób z amplitudą i czasem pojawienia się impulsu. Sprawdzono w oparciu o próbki impulsów zebranych w testach prototypu, że amplituda i czas pojawienia się impulsu uzyskane z zastosowaniem filtra są bardzo bliskie wartościom uzyskanym przez dopasowanie do próbek funkcji opisującej kształt impulsu, uzyskanej ze znanej transmitancji front-endlu.

Wyznaczono stosunek sygnału do szumu dla impulsów odpowiadających cząstkom w minimum jonizacji. Wyniósł on ok. 12 dla kanałów front-endlu, w których zastosowano pasywny opór w obwodzie sprzężenia zwrotnego przedwzmacniacza i ok. 20 w kanałach ze sprzężeniem zwrotnym wykorzystującym tranzystor MOS.

Wyznaczony został profil strat energii w kaskadach elektromagnetycznych odpowiadających 5 GeV elektronom wiązki. Posiada on maksimum na głębokości odpowiadającej ok. 6 długościom radiacyjnym. Jego kształt jest dobrze opisywany przez przeprowadzone symulacje Monte Carlo rozwoju kaskad z wykorzystaniem pakietu Geant i DD4Hep. Pewien niedosyt budzi brak wyników dotyczących rekonstrukcji pozycji kaskad istotnej z punktu widzenia wyznaczania kąta rozproszenia e+e- w LumiCalu. Autor tłumaczy jednak, że przewidziana jest kontynuacja prac nad rekonstrukcją pozycji, której częścią będzie uwzględnienie w bardziej szczegółowy sposób geometrii prototypu.

Rozdział trzeci - najbardziej obszerny - poświęcony jest prezentacji projektu i testów nowej generacji układu front-endlu i ADC do LumiCalu opracowanych jako układy ASIC w technologii CMOS 130 nm. Rozdział rozpoczyna się od prezentacji wyników symulacji prostych obwodów analogowych i cyfrowych zrealizowanych w technologii AMS 350 nm, oraz w dwóch technologiach CMOS 130 nm określonych jako proces A i proces B, dla porównania ich kluczowych parametrów. Symulacje wewnętrznego wzmocnienia tranzystorów NMOS and PMOS wykonane dla różnych długości i szerokości kanału wykazały kilkakrotnie mniejszą wartość wzmocnienia dla CMOS 130 nm proces B w porównaniu z AMS 350 nm, a najmniejszą wartość dla CMOS 130 nm proces A. Symulacje układów cyfrowych wykazały o ok. rząd wielkości mniejsze zużycie prądu i mocy w

układach CMOS 130 nm w porównaniu z AMS 350 nm, oraz ok. 3 razy krótszy czas propagacji.

Nowy, 8-kanalowy ASIC front-endu zaprojektowany został w technologii CMOS 130 nm proces A. Obejmuje on wzmacniacz ładunkoczuły, obwód PZC oraz układ kształtujący CR-RC. Dwa przełączalne zakresy wzmocnienia umożliwiają rejestrację impulsów w trybie fizycznym i trybie kalibracyjnym. Czas osiągnięcia maksimum impulsów wynosi 50 ns i jest wystarczający dla rozdzielania sygnałów od cząstek przychodzących w kolejnych zderzeniach pakietów wiązek następujących po sobie co ok. 350 ns. ASIC posiada opcję wyłączenia prądu zasilania na czas pomiędzy zderzeniami wiązek na ILC wynoszący 200 ms i jego szybkiego włączenia w trakcie ok. 1 μ s na okres zderzeń wynoszący 1 ms, co znacznie redukuje zużywaną moc. Testy front-endu przeprowadzone z impulsami z generatora potwierdziły, że spełnia on postawione wymagania i m.in. stwierdzono oczekiwaną słabą zależność wysokości i kształtu impulsów wyjściowych od pojemności na wejściu, akceptowalny rozrzut linii bazowych w różnych kanałach, niski poziom szumów odpowiadający ENC poniżej 1000 e dla pojemności wejściowej 10 pF oraz niskie zużycie mocy wynoszące 1.55 mW na kanał. Przy wyłączeniu zasilania pomiędzy okresami zderzeń, moc tą można zredukować co najmniej o dwa rzędy wielkości.

Projekt 10 bitowego ADC, w odróżnieniu od pierwszej wcześniejszej wersji wykonanej w technologii AMS 350 nm z zastosowanym przetwarzaniem potokowym, ze względu na niższe wzmocnienia układów oraz wyższe maksymalne częstotliwości w technologii CMOS 130 nm, oparto o architekturę kolejnych przybliżeń (SAR) z konwerterem DAC na przełączanych pojemnościach. Wybrano różnicową wersję tego konwertera. Dokonano przeglądu i symulacji dostępnych algorytmów przełączania pojemności pod kątem wydatku energii na przeładowanie kondensatorów. Wybrano schemat określany w literaturze jako „Merged Capacitor Switching” wymagający dodatkowego napięcia referencyjnego, ale charakteryzujący się kilkakrotnie mniejszym zużyciem mocy w porównaniu z konwencjonalnym schematem przełączania.

ADC wyposażone jest w układ próbkujący oparty o tzw. „bootstrapped switches”, dynamiczny komparator oraz układ logiki kontrolnej pracującej w trybie asynchronicznym.

Wykonano trzy prototypy ADC – dwa pierwsze w technologii CMOS 130 nm proces A i trzeci w technologii CMOS 130 nm proces B.

Dla przeprowadzenia testów ADC przygotowano system akwizycji oparty o FPGA. System ten dostarcza sygnały wejściowe i zegar do ADC oraz odczytuje dane wyjściowe. Do pomiarów parametrów dynamicznych ADC wykorzystano precyzyjny generator przebiegów sinusoidalnych podłączony do wejścia za pośrednictwem filtra dolnoprzepustowego tłumiącego szum o wysokiej częstotliwości. Dyskretna transformata Fouriera wyliczona dla serii próbek z ADC posłużyła do wyznaczenia parametrów określających całkowite zniekształcenia harmoniczne (THD), stosunek sygnału do szumu nie będącego zniekształceniami harmonicznymi (SNHR), zakres wolny od zniekształceń (SFDR), stosunek sygnału do szumu i zniekształceń (SINAD) oraz efektywna liczba bitów (ENOB). Uzyskane wyniki testów są w pełni zadowalające, a szczególnie dobre wartości parametrów uzyskano dla trzeciego prototypu. Wartość nieliniowości różniczkowej i nieliniowości całkowitej, zmierzonej przy częstotliwości próbkowania 10 MHz, jest mniejsza niż odpowiednio 0.2 i 0.3 najmniej znaczącego bitu. Efektywna liczba bitów osiąga znakomity poziom 9.92. Zużycie mocy przy częstotliwości próbkowania 40 MHz wynosi zaledwie 0.74 mW na kanał. Zamieszczone w pracy porównanie kluczowych parametrów współczesnych 10 bitowych ADC o architekturze SAR znanych z literatury fachowej wskazuje, że obecny projekt należy do najlepszych, a jeśli chodzi o wartości nieliniowości różniczkowej i całkowitej, efektywnej liczby bitów oraz wielkości powierzchni zajmowanej przez układ, jest najlepszy.

Przechodząc do oceny pracy stwierdzam jej wysoki poziom, w szczególności, w jej zasadniczej części dotyczącej zarówno analizy danych, jak i przygotowania projektu nowej wersji elektroniki odczytu. Praca świadczy o bardzo dobrym opanowaniu przez doktoranta metod i narzędzi projektowania układów elektroniki analogowej i cyfrowej. Autor wykazał się również znajomością zaawansowanych metod analizy danych eksperymentalnych i dobrą orientacją w tematyce związanej z planowanymi badaniami. Uzyskane wyniki są interesujące z punktu widzenia techniki odczytu detektorów cząstek i ważne dla realizacji detektora LumiCal. Opracowany układ ADC charakteryzuje się jednymi z najlepszych parametrów w grupie układów o podobnych specyfikacjach.

Praca jest bardzo obszerna, zawiera bowiem 184 strony. Wynika to z różnorodności wykonanych analiz, prac projektowych i testów. Ich przeprowadzenie wymagało według mnie bardzo dużego nakładu pracy i zostało zrobione rzetelnie i pomysłowo.

Praca napisana jest jasnym, precyzyjnym językiem. Przed poruszaniem nowych zagadnień autor wprowadza w nie czytelnika podając najistotniejsze ogólne informacje. Szczegóły techniczne pracy tłumaczy umiejętnie, bez stosowania nadmiernych skrótów.

Praca jest bardzo starannie zredagowana o czym może świadczyć fakt, że znalazłem w niej jedynie dwie drobne usterki:

- na stronie 63, podany rozmiar scyntylatorów $5 \times 5 \text{ mm}^2$ powinien prawdopodobnie wynosić $50 \times 50 \text{ mm}^2$ na co wskazuje m.in. rysunek 2.13,

- nie podano znaczenia symbolu D_k występującego we wzorze 3.15 na stronie 116.

Usterki te nie wpływają istotnie na wartość pracy.

Na wyróżnienie zasługują prezentowane w pracy rysunki, których jest 162, ze względu na czytelność i dopracowanie graficzne.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska pana Jakuba Moronia stanowi istotny wkład w dziedzinie rozwoju elektroniki odczytu do detektorów cząstek i w pełni spełnia warunki rozprawy na stopień doktora nauk fizycznych. W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

