

Development of novel low-power, submicron CMOS technology based, readout system for luminosity detector in future linear collider

Jakub Moroń

Streszczenie

Zrozumienie budowy materii i praw natury rządzących jej składnikami stanowi główny cel współczesnych eksperymentów Fizyki Wysokich Energii. Coraz większa statystyka danych wraz z rosnącą energią zderzeń cząstek na Wielkim Zderzaczach Hadronów LHC (ang. Large Hadron Collider) pozwoli najprawdopodobniej wyjaśnić mechanizm nadawania masy cząstkom elementarnym poprzez bozon Higgsa, którego obecność została potwierdzona niezależnie przez dwa eksperymenty na LHC, ATLAS i CMS, w kwietniu 2013 roku. Obok badań pozwalających na rozszerzenie i uzupełnienie Modelu Standardowego (ang. Standard Model), stanowiącego obecnie podstawowy opis materii, dane uzyskane z współczesnych i przyszłych eksperymentów pozwolą być może sięgnąć jeszcze głębiej w historię wszechświata, ujawniając informacje na temat ciemnej materii i ciemnej energii, będących według współczesnej kosmologii, przeważającymi jego częściami.

Nowo odkrywane zjawiska i związane z nimi procesy fizyczne wymuszają dalszy rozwój eksperymentów na akceleratorach cząstek. Sięgnięcie poza Model Standardowy (ang. Beyond Standard Model) w kierunku Nowej Fizyki (ang. New Physics) wymagać będzie dalszego zwiększenia energii zderzeń zachodzących w akceleratorach. Do precyzyjnego pomiaru własności i parametrów nowych cząstek, takich jak bozon Higgsa, potrzebny będzie ponadto dużo prostszy system zderzeń niż proton-proton, stosowany obecnie na LHC. Takim systemem, umożliwiającym ponadto znacznie precyzyjniejszą rekonstrukcję zdarzeń w obecności niższego tła, może być układ zderzeń dwóch leptonów, a w szczególności pozytonu i elektronu. Współcześnie prowadzone są prace rozwojowe nad dwoma międzynarodowymi projektami zderzacza leptonów: Międzynarodowym Zderzaczem Liniowym ILC (ang. International Linear Collider) i Kompaktowym Zderzaczem Liniowym w CERN CLIC (ang. Compact Linear Collider at CERN). Poza istotnymi różnicami dzielącymi oba projekty, tj. technologią przyspieszania leptonów i maksymalną energią dostępną w centrum masy, założenia systemów detekcyjnych w obu eksperymentach są do siebie zbliżone. Oba projekty bazują na precyzyjnej rekonstrukcji energii i torów tak cząstek pierwotnych jak i wtórnych (ang. Particle Flow), stawiając bardzo wysokie wymagania detektorom i systemom odczytowym przyszłych eksperymentów. Niezwykle wysoka precyzja pomiaru położenia cząstek wymagać będzie bardzo wysokiej segmentacji przestrzennej detektorów, zwiększając wielokrotnie liczbę kanałów elektroniki odczytu. Pociąga to za sobą wzrastające wymagania tak na minimalizację poboru mocy elektroniki odczytu jak i wymusza coraz efektywniejsze metody przetwarzania i transmisji sygnałów z detektora.

Głównym celem niniejszej rozprawy jest rozwój systemu odczytowego dla detektora świetlności LumiCal (ang. Luminosity Calorimeter) w przyszłym eksperymencie na zderzaczach liniowych. Detektor, a właściwie kalorymetr ten odpowiedzialny będzie za precyzyjny pomiar świetlności akceleratora, niezbędny do precyzyjnej analizy danych zebranych w eksperymencie. Prace badawczo-rozwojowe (ang. Research and Development) nad detektorem LumiCal prowadzone są w ramach międzynarodowej współpracy FCAL skupiającej wiele instytutów badawczych z różnych krajów i kontynentów, w tym Katedrę Oddziaływań i Detekcji Cząstek na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Powyższa rozprawa prezentuje prace

przeprowadzone przez autora, tak przy budowie i uruchomieniu prototypu detektora LumiCal, przeprowadzaniu testów na wiązce i analizie ich wyników, jak również przy rozwoju nowatorskiego systemu odczytu dla tego detektora, bazującego na dedykowanych układach scalonych ASIC (ang. Application Specific Integrated Circuit) wykonanych w głęboko submikronowych technologiach CMOS (ang. Complementary Metal Oxide Semiconductor). Większość tekstu rozprawy opisuje prace wykonane przez autora, jednak dla zrozumiałości i zachowania spójności, pokrótce przedstawione zostały ogólne zagadnienia związane z tematyką zderzaczy liniowych, detektora LumiCal oraz istniejącą już pierwszą wersją modułu odczytowego tego detektora.

Pierwszy rozdział rozprawy prezentuje ogólne zagadnienia dotyczące założeń i konstrukcji akceleratorów liniowych, wykonywanych na nich eksperymentów, jak również systemu detektorów tych eksperymentów. Zaczynając od ogólnego przedstawienia obecnego stanu wiedzy, przedstawiona została rola liniowych akceleratorów w zrozumieniu budowy materii, jak i dostarczane przez nie możliwości sięgnięcia w kierunku Nowej Fizyki. Zaprezentowane zostały wymagania stawiane przyszłym eksperymentom na tych zderzaczach, jak i proponowane przez międzynarodowe kolaboracje rozwiązania, czyli eksperymenty ILC i CLIC. Przedstawione zostały również planowane systemy detekcyjne tych eksperymentów, ze szczególnym naciskiem położonym na tzw. detektory „do przodu” (ang. Forward Region) -- BeamCal oraz LumiCal. Pierwszy z nich odpowiedzialny jest za szybkie dostarczenie informacji niezbędnych do ciągłego monitorowania i kontrolowania wiązki, podczas gdy drugi, którego system odczytowy stanowi główną tematykę niniejszej rozprawy, odpowiedzialny jest za precyzyjny pomiar świetlności. Przedstawiona została istota pomiaru świetlności i jego znaczenie dla eksperymentu. Na koniec omówione zostały główne założenia systemu odczytowego, jego architektura oraz istniejący prototyp w postaci modułu odczytowego, zawierającego pierwszą generację dedykowanych układów scalonych elektroniki odczytu. Układy te również zostały poglądowo omówione. Dla dopełnienia, poglądowo zaprezentowane zostały także zagadnienia generacji sygnału w detektorze krzemowym i jego przetwarzania w torze elektroniki odczytu.

W rozdziale drugim przedstawione zostały pierwsze pomiary na wiązce wykonane za pomocą wielopłaszczyznowego modułu detektora LumiCal. Rozdział rozpoczyna się opisem wstępnych prac przygotowujących istniejące moduły odczytowe do pracy wielopłaszczyznowej, następnie zaprezentowana jest konstrukcja i architektura modułu detektora, w którego budowie i wstępnych testach autor brał aktywny udział. Omówione zostało również oprzyrządowanie systemu pomiarowego użytego podczas testów na wiązce akceleratora protonów PS (ang. Proton Synchrotron) w CERN. Analiza danych zebranych w czasie testów wymagała przygotowania dedykowanego oprogramowania umożliwiającego ekstrakcję, obróbkę i wieloaspektową analizę otrzymanych danych, tak z modułu detektora LumiCal, jak i ze wspomagającego pomiar detektora mierzącego tory cząstek, tzw. teleskopu. Autor szczegółowo omawia zagadnienia związane z analizą danych z obu detektorów. Przedstawiona i przedyskutowana została procedura znalezienia precyzyjnego położenia płaszczyzn teleskopu (ang. alignment) w celu dokładnej rekonstrukcji torów cząstek. W przypadku detektora LumiCal autor rozważa pełny proces wstępnej obróbki danych, obejmujący w szczególności usunięcie składowych stałych (ang. baseline, pedestal) oraz sygnału wspólnego (ang. common mode) na różnych kanałach odczytowych. Ze względu na użycie pierwszej wersji modułów odczytowych nie projektowanych z myślą o pracy wielopłaszczyznowej, zagadnienie redukcji zakłóceń wspólnych było niezwykle istotnym czynnikiem obróbki danych, umożliwiającym zdecydowaną poprawę finalnego stosunku sygnału do szumu w detektorze. W dalszej kolejności autor przedstawia nowatorską metodę rekonstrukcji sygnału (ładunku) deponowanego w sensorze krzemowym poprzez zaawansowaną procedurę cyfrowej obróbki danych (ang. Digital Signal Processing). Rezultaty uzyskane powyższymi metodami umożliwiły autorowi wykonanie analiz fizycznych zebranych danych, w szczególności pozwoliły na przedstawienie rozwoju kaskady elektromagnetycznej (ang. electromagnetic shower),

jako jednego z podstawowych celów pomiarowych detektora LumiCal. Wyniki analiz zostały zebrane i przedyskutowane na zakończenie rozdziału drugiego.

Równoległe z pracami nad przygotowaniem i przeprowadzeniem testów na wiązce prototypu detektora LumiCal, autor prowadził prace nad koncepcją, rozwojem i testami drugiej generacji dedykowanych układów odczytu detektora LumiCal w głęboko submikronowych technologiach CMOS. Rosnące wymagania na redukcję poboru mocy, zwiększenie odporności radiacyjnej i zwiększenie gęstości upakowania kanałów, wymuszone rosnącymi wymaganiami dla detektorów w przyszłych eksperymentach Fizyki Wysokich Energii, pociągają za sobą konieczność stałego rozwoju układów elektroniki odczytu. W szczególności trudności związane z obróbką, gromadzeniem i transmisją analogowych danych pomiarowych, przy rosnącej ilości kanałów i częstotliwości zdarzeń rejestrowanych w detektorze, wymagają nowatorskiego podejścia do zagadnienia przetwarzania sygnału z sensora. Klasyczny układ analogowego przedwzmacniacza wraz z układem kształtującym (ang. front-end), zwielokrotniony do postaci układu wielokanałowego jest obecnie standardem stosowanym we współczesnych systemach detekcji. Jednakże zastosowanie przetwornika analogowo-cyfrowego (ang. Analog to Digital Converter), indywidualnie w każdym z kanałów, pozostawało dotychczas w strefie rozważań teoretycznych, głównie ze względu na wysoki pobór mocy takich przetworników. Zastosowanie takiego rozwiązania uprościłoby architekturę elektroniki odczytu, przynosząc równocześnie wiele korzyści w dalszej obróbce danych, dostępnych bezpośrednio w cyfrowej postaci. W efekcie mogłaby też istotnie wzrosnąć szybkość przetwarzania cyfrowych już danych, tak ważna i wymagana dla detektorów w przyszłych eksperymentach Fizyki Cząstek.

Nowe generacje głęboko submikronowych technologii CMOS otwierają nowe możliwości dla rozwoju elektroniki odczytu detektorów. Rozpoczynając rozdział trzeci, autor przedstawia podstawową charakterystykę trzech technologii -- jednej, wykorzystanej w obecnie istniejącym module odczytowym detektora LumiCal, oraz dwóch bardziej zaawansowanych (o mniejszym rozmiarze charakterystycznym, tj. mniejszej minimalnej długości kanału tranzystora MOS), przeznaczonych dla nowej generacji systemu odczytu. Wykazane zostały zalety nowych submikronowych technologii CMOS, takie jak większa częstotliwość pracy przy jednoczesnym zmniejszeniu poboru mocy, kosztem jednakże zmniejszonego wzmocnienia tranzystorów. Niższe wzmocnienie stanowi wyzwanie dla projektu analogowego przedwzmacniacza ładunkowego (ang. charge preamplifier), koniecznego dla ekstrakcji i kształtowania sygnału z sensora. Opierając się na tych rozważaniach, autor przedstawia założenia i projekt drugiej generacji dedykowanego układu front-end dla detektora LumiCal. Wyniki pomiarów prototypowego układu, wykonanego w technologii CMOS 130 nm, przedstawione w rozdziale trzecim, potwierdzają poprawną i zgodną ze specyfikacją pracę układu.

Najistotniejszą (najtrudniejszą) część rozwoju elektroniki odczytowej stanowi projekt 10-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego (ang. ADC), przystosowanego do integracji wielokanałowej. Autor przedstawia początkowe rozważania nad założeniami i implementacją przetwornika, wykazując wysoki potencjał architektury kolejnych przybliżeń SAR (ang. Successive Approximation Register). Omówiony został wykonany przez autora projekt 10-bitowego przetwornika SAR ADC oraz założenia leżące u podstaw procedury symulacyjno-pomiarowej, niezbędnej tak do weryfikacji projektu w fazie rozwojowej, jak i pomiaru parametrów wykonanego prototypu. Następnie przedstawione zostały wyniki pomiarów trzech prototypów przetwornika, wykonanych w dwóch głęboko submikronowych technologiach CMOS 130 nm. W szczególności trzeci z prototypów wykazał się doskonałymi parametrami, stawiającymi ten projekt wśród najlepszych dostępnych na świecie układów. Uzyskany znikomy, w porównaniu do przetwornika zastosowanego w pierwszej generacji odczytu, pobór mocy umożliwia implementację 10-bitowego przetwornika ADC w każdym z kanałów elektroniki odczytu, wraz z poprzedzającym go układem przedwzmacniacza ładunkowego i układu kształtującego.

Bazując na wykonanych układach elektroniki front-end i ADC, w kolejnym kroku możliwe będzie zaprojektowanie i wykonanie pełnego (integrującego wszystkie funkcjonalności) wielokanałowego układu odczytowego detektora LumiCal. Będzie to następne zadanie autora. Układ taki będzie jednym z pierwszych, o ile nie pierwszym na świecie, wielokanałowych dedykowanych układów odczytu, z szybkim przetwornikiem ADC w każdym kanale.

Wyznaczone cele pracy zostały w pełni przez autora zrealizowane. Przygotowane i wykonane testy na wiązce wielopłaszczyznowego modułu detektora LumiCal dostarczyły danych, których analiza potwierdziła spełnienie bazowych założeń i pokazała dalsze możliwości rozwojowe projektu. Prowadzone równolegle prace nad projektem nowej generacji elektroniki odczytu doprowadziły do powstania w pełni funkcjonalnych dedykowanych układów scalonych w głęboko submikronowych technologiach CMOS. W szczególności projekt 10-bitowego przetwornika ADC otwiera nową drogę dla rozwoju wielokanałowych systemów odczytu detektorów.

Podczas długiej działalności związanej z pracami badawczo-rozwojowymi, autor rozprawy zdobył unikalne doświadczenie przy budowie oraz testowaniu zaawansowanych systemów detekcji promieniowania, w szczególności obejmujące projektowanie i testowanie dedykowanych układów scalonych ASIC. Prace autora związane były ze wszystkimi fazami rozwoju typowego eksperymentu Fizyki Cząstek, od prac koncepcyjnych i konstrukcyjnych rozpoczynając, poprzez rozwój podstawowych składników systemu odczytowego i dedykowanej elektroniki, a następnie przygotowaniu i uczestnictwie w testach na wiązce, kończąc na opracowaniu i analizie uzyskanych danych eksperymentalnych.

Kraków, 9.07.2015r