



dr hab. Paweł Brückman de Renstrom, prof. IFJ PAN  
Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
ul. Radzikowskiego 152  
32-342 Kraków

Kraków, 08.07.2019 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Romy Bugiel zatytułowanej  
„Beam test studies of monolithic pixel structures for CLIC vertex detector”**

Rozprawa doktorska pani Romy Bugiel zatytułowana „Beam test studies of monolithic pixel structures for CLIC vertex detector” opisuje metody badawcze, przebieg oraz wyniki testów prototypowych detektorów pikselowych dla detektora CLIC wykonanych w technologii monolitycznej. Testom na wtórnej wiązce hadronowej z akceleratora SPS w CERN oraz szczegółowej analizie zebranych danych poddane zostały dwie generacje prototypowych detektorów krzemowych, kolejno w latach 2016 i 2017.

Liniowy zderzacz CLIC (Compact Linear Collider) to jeden z możliwych scenariuszy następnej generacji eksperymentów akceleratorowych w CERN. Projekt przewiduje budowę zderzacza składającego się z dwóch przeciwniebieżnych liniowych akceleratorów zderzających elektrony i pozytony w sercu centralnie położonego uniwersalnego spektrometru. Maksymalna projektowana energia zderzeń w środku masy to 3 TeV. Systemem położonym najbliżej punktu oddziaływania ma być krzemowy detektor pikselowy, spełniający bardzo rygorystyczne wymagania jak na obecny stan rozwoju technologii detekcyjnych. Przede wszystkim, wymagana rozdzielczość przestrzenna musi być lepsza niż  $3\ \mu\text{m}$ , rozdzielczość czasowa poniżej 10 ns, a całkowity budżet materiałowy pojedynczej warstwy ma nie przekraczać  $200\ \mu\text{m}$  krzemu. Dodatkowym wymaganiem jest wysoka odporność na promieniowanie jonizujące. W takich warunkach obiecującym rozwiązaniem są monolityczne detektory, łączące aktywną objętość detektora ze strukturą wzmacniacza ładunkowego w wielowarstwowej strukturze krzemowej. Są to nowatorskie rozwiązania zyskujące coraz większą popularność, jednak ze względu na złożoność procesu produkcyjnego i różnorodność możliwych rozwiązań są cały czas w fazie intensywnych badań i rozwoju.

Pani mgr Bugiel w ramach pracy doktorskiej przygotowała niezbędne oprogramowanie, przy pomocy którego przeanalizowała wyniki testów na wiązce prototypów autorskich detektorów zaprojektowanych przez krakowski zespół, a wykonane w japońskiej technologii Lapis 200 nm SOI (*Silicon-on-Insulator*) CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). Powyższa technologia umożliwia zintegrowanie na jednej płycie krzemowej detektora cząstek wykonanego z półprzewodnika krzemowego wysokiej rezystywności oraz elektroniki odczytu wykonanej w krzemie o niskiej rezystywności. To powoduje, że struktura SOI doskonale nadaje się do tworzenia detektorów monolitycznych. Prototypowe detektory posiadały matryce składające się z  $16 \times 32$  pikseli o wymiarach  $30 \times 30\ \mu\text{m}^2$  i były wykonane na dwóch różnych podłożach krzemowych, a to *Floating Zone* typu n oraz *Double SOI* typu p. W obu przypadkach testowe struktury zawierały połowę pikseli wyposażonych w przedwzmacniacze typu *Source Follower* (SF) i połowę wyposażonych w przedwzmacniacze typu *Charge-sensitive Preamplifiers* (CPA). Na uwagę zasługuje fakt, że choć praca dotyczy głównie analizy testów na wiązce i dyskusji wyników, doktorantka wniosła również istotny wkład na etapie projektowania prototypowych detektorów oraz uczestniczyła w samym procesie zbierania danych na wiązce SPS w CERN. Tak więc rozprawa de facto opisuje jedynie część pracy wykonanej przez doktorantkę.

Przedstawiona do recenzji rozprawa pani mgr Bugiel składa się z krótkiego wprowadzenia, pięciu głównych rozdziałów, podsumowania, zbioru uzupełniających rycin oraz bibliografii zawierającej 53 pozycje. Praca napisana jest w języku angielskim z dodatkiem zwięzłego streszczenia w języku polskim.

Rozdział 1 zawiera krótki opis projektu CLIC, przewidywanego programu fizycznego i wynikających z stąd wymagań stawianych projektowanemu uniwersalnemu spektrometrowi, w którego sercu ma się znajdować CLIC Vertex Detector, stanowiący przedmiot niniejszej rozprawy. Autorka przedstawia w nim koncepcyjny projekt detektora wierzchołka posiadającego trzy podwójne cylindryczne





warstwy detektorów pikselowych uzupełnione na obu końcach spiralnymi domknięciami złożonymi z detektorów o trapezoidalnym kształcie. Głównym zadaniem tego detektora, położonego najbliżej osi akceleratora, jest precyzyjna rekonstrukcja położenia toru cząstek naładowanych w punkcie oddziaływania (tzw. parametr zderzenia). Wymaga to z jednej strony wysokiej rozdzielczości przestrzennej samego detektora, z drugiej zaś minimalnej ilości materiału, z którego jest zbudowany, w celu ograniczenia wielokrotnego rozpraszania podczas propagacji w gęstym ośrodku. Ostatni warunek stawia wiele wymagań. Z jednej strony warstwy krzemu nie mogą przekraczać 200  $\mu\text{m}$ , z drugiej zaś pobór mocy musi być na tyle niski, aby umożliwić chłodzenie gazowe. Autorka wskazuje też, że projektowana rozdzielczość ( $<3 \mu\text{m}$ ) wymaga pikseli o rozmiarze co najwyżej  $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ . W pracy nie znalazłem jednak wyjaśnienia, dlaczego testowane detektory prototypowe miały nieco większe piksele ( $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ ). W dalszej części rozdziału znajduje się przegląd istniejących technologii, w szczególności porównanie pikselowych układów hybrydowych z oddzielną strukturą detektora i elektroniki odczytu oraz rozwijanych technologii monolitycznych. Te ostatnie poza znacznym uproszczeniem konstrukcji pozwalają na drastyczne obniżenie budżetu materiałowego. Osobny podrozdział poświęcony jest technologii Double SOI (DSOI), w której wykonana została połowa testowanych prototypów. Pewien niedosyt pozostawia jednak brak bezpośredniego odniesienia i krótkiego opisu technologii Floating Zone (FZ), w której wykonane zostały pozostałe testowane struktury.

Rozdział 2 przynosi użyteczny przegląd ogólnych wiadomości na temat półprzewodnikowych detektorów cząstek jonizujących i szczegółowo dyskutuje kluczowe parametry tych urządzeń, a to wydajność i rozdzielczość przestrzenną wraz z czynnikami które mają na nie istotny wpływ.

Rozdział 3 poświęcony jest omówieniu konkretnych rozwiązań projektowych zastosowanych w prototypowych detektorach. I tu po raz pierwszy, w tabeli 3.1, pojawia się pojęcie Floating Zone którego wyjaśnienia brakowało w rozdziale 1. Dokładnie opisane są struktury wyprodukowane do testów na wiązce wyposażone w dwie architektury wstępnego wzmocnienia sygnału, czyli *source follower* (SF) oraz *charge preamplifier* (CP). SF jest mniej skomplikowana architekturą charakteryzującą się potencjalnie mniejszym poziomem szumu. Z drugiej strony stopień wzmocnienia zależy tam odwrotnie proporcjonalnie do pojemności wejściowej detektora. Dlatego pierwotnie nie był przewidziany dla matryc DSOI charakteryzujących się większą pojemnością. W końcu, w rozdziale 3 opisany został system odczytu zastosowany podczas testów oraz infrastruktura dostępna na wiązce testowej H6 w północnej hali eksperymentalnej SPS w CERN.

Rozdział 4 szczegółowo opisuje poszczególne etapy analizy danych i zastosowane w nich metody. Rekonstrukcja śladów cząstek zarejestrowanych przez teleskop referencyjny wykonywana jest przez istniejące oprogramowanie EU Telescope i nie stanowiła przedmiotu niniejszej pracy. Przygotowane przez autorkę oprogramowanie miało na celu rekonstrukcję klastrow pochodzących od przejścia cząstek jonizujących, ich selekcję, precyzyjne wyznaczenie punktu przejścia cząstki (hitu) za pomocą rozkładu wielkości sygnału w poszczególnych pikselach klastra oraz przypisanie do już zrekonstruowanych śladów z teleskopu. Szczególnie szczegółowo opisane są różne sposoby rekonstrukcji klastrow, a opis poparty jest bardzo przejrzystą ikonografią. W sumie zdefiniowanych jest 6 sposobów, do których autorka odwołuje się w kolejnym rozdziale dyskutując wyniki. Definicja klastra ma bezpośredni wpływ na zrekonstruowaną pozycję hitu, a różne definicje mogą okazać się odpowiednie dla różnych wariantów hardwarowych. Prosta rekonstrukcja hitu za pomocą środka ciężkości klastra (COG – średnia pozycja pikseli ważona wielkością zebranego sygnału) stanowi pierwsze przybliżenie, ale jest w ogólności nieoptymalna. Autorka opisuje szczegółowo zastosowaną korekcję (zwyczajowo zwaną korekcją  $\eta$ ) opartą na metodzie odwracania dystrybucji, która prowadzi do statystycznie optymalnego oszacowania pozycji hitu. Kolejny podrozdział poświęcony jest optymalizacji algorytmu selekcji i przypisywania klastrow do zrekonstruowanych śladów. Zbyt liberalne kojarzenie może sztucznie pogorszyć mierzoną rozdzielczość równocześnie zawiązując wydajność. Zbyt restrykcyjne kojarzenie prowadzi w ogólności do przeciwnych przekłamań. W końcu, dyskutowane są efekty hardwarowe zaburzające poprawną rekonstrukcję klastrow i zastosowane w dalszej analizie metody selekcji mające na celu minimalizację ich wpływu na wyniki. Rozdział 4 napisany jest bardzo wnikliwie i dowodzi fachowości autorki. Szkoda tylko że kwestia alignmentu (precyzyjnego pozycjonowania detektora względem teleskopu) zasygnalizowana w rozdziale 4.1.3 nie została poruszona w dalszej części rozdziału.

Rozdział 5 stanowi najobszerniejszą i najważniejszą część rozprawy. Prezentuje kolejno wszystkie dokonane pomiary i dyskutuje je w świetle zastosowanych technologii detektorowych. Na wstępie przedstawione są wyniki pomiarów podstawowych parametrów niezbędnych do dalszej analizy, czyli





INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

poziomu odniesienia, szumu, stosunku sygnału do szumu, rezystywności krzemu zastosowanego w warstwie aktywnej. Osobny podrozdział poświęcony jest analizie rozmiaru klastrów w poszczególnych wariantach testowanych detektorów. Autorka wnikliwie analizuje ciekawy efekt spadku średniego rozmiaru klastrów wraz ze wzrostem napięcia polaryzacji w detektorach typu FZ i tłumaczy go wpływem dyfuzji ładunków w niezubożonej objętości detektora. Efektu tego nie obserwuje w matrycach DSOI i tłumaczy to znacznie mniejszą rezystywnością zastosowanego krzemu. Jednak ze względu na niemożność pełnego spolaryzowania matryc prototypów DSOI, wnioski nie mogą być w ich przypadku ostateczne. Kolejne dwa podrozdziały poświęcone są najistotniejszym parametrom detektorów, czyli wydajności i rozdzielczości przestrzennej. Zarówno prototypy FZ jak i DSOI osiągają zadowalającą wydajność powyżej 95% biorąc pod uwagę wpływ pile-up'u i czasu martwego detektora. Najbardziej złożonej analizie wymagała rozdzielczość przestrzenna. Zależy ona bowiem od technologii detektora, zastosowanej metody rekonstrukcji klastrów, sposobu dopasowania funkcji rozdzielczości (Gausa) do uzyskanych rozkładów residuów a w końcu od zastosowania korekcji  $\eta$  opisanej w rozdziale 4. Dyskusja wpływu zastosowanej metody rekonstrukcji klastrów i związanej z tym skuteczności korekcji  $\eta$  wydała mi się szczególnie ciekawa. Spośród badanych prototypów najlepszą rozdzielczość przestrzenną osiągnęły matryce FZ wyposażone w przedwzmacniacz typu Source Follower (nieco ponad  $2\ \mu\text{m}$ ), które równocześnie charakteryzują się najlepszym stosunkiem sygnału do szumu (ok 350). Istotnie lepszą rozdzielczość obserwowana była w kierunku Y, co jest interpretowane wpływem przesłuchu pomiędzy pikselami sąsiadującymi w kierunku X. Sam efekt jest zasygnalizowany już w rozdziale 4, ale praca nie podaje jego głębszej przyczyny. Testowane matryce w technologii DSOI -p wykazują istotnie gorszą rozdzielczość, ale jest to najprawdopodobniej spowodowane zwiększonym prądem upływu tych prototypów i związaną z tym niemożnością ich pełnej polaryzacji.

Praca jest dobrze napisana choć bardziej wnikliwa korekta językowa ułatwiłaby odbiór niektórych fragmentów. Organizacja materiału jest w zasadzie przejrzysta, choć umieszczenie dyskusji projektowanych dla CLIC'a technologii po wprowadzeniu podstawowych wiadomości na temat fizyki detektorów półprzewodnikowych (rozdział 2) ułatwiłoby odbiór mniej fachowemu czytelnikowi. Praca zawiera dużo ciekawego materiału eksperymentalnego a jego usystematyzowanie z pewnością nie było łatwe. Niemniej, szczegółowy dobór informacji mógłby być poprawiony. Na przykład przegląd technologii dostępnych od Lapis Semiconductor Technologies pojawiający się na początku rozdziału 3 w tabeli 3.1 nie znajduje bezpośredniego odniesienia w poprzedzających go rozdziałach. Brak też komentarza, dlaczego testowe struktury mają grubość 500 i 300  $\mu\text{m}$  odpowiednio w przypadku FZ i DSOI a nie projektowane dla CLIC 200  $\mu\text{m}$ . Podobnie rzecz ma się z wielkością piksela, nieco większą niż postulowany w rozdziale 1  $25\times 25\ \mu\text{m}^2$ . Procedury eksperymentalne zostały szczegółowo udokumentowane. Jedyne niedosyt sprawia bardzo lakoniczna informacja na temat pozycjonowania detektorów testowych względem teleskopu (alignment) i ewentualnego wpływu na uzyskane wyniki. Niemniej, postawiony w pracy cel badawczy został osiągnięty. Autorka uzyskała szereg wartościowych wyników będących cenną wskazówką dla dalszego rozwoju projektu pikselowych detektorów monolitycznych. Brak możliwości wyciągnięcia niektórych ostatecznych konkluzji (w szczególności dotyczących prototypów DSOI) miało swe źródło w nieprzewidzianych niedoskonałościach dostarczonych prototypów i nie wynikało z zaniedbań doktorantki.

Powyższe uwagi nie mają, jednakże, wpływu na jednoznacznie pozytywną ocenę pracy, która dokumentuje rzetelnie przeprowadzoną pracę badawczą i dostarcza wartościowych wyników. Nie mam wątpliwości, że przedstawiona praca w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę do Rady Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH o dopuszczenie pani mgr Romy Bugiel do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z poważaniem  
Paweł Brückman de Renstrom

