

Kraków, 30 czerwiec 2019 rok.

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

**RECENZJA**  
**pracy doktorskiej mgr. inż. Romy Bugiel**  
**pt. „Beam test studies of monolithic pixel structures for CLIC vertex detector”**

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 Higgosa, dokładne testy Modelu Standardowego i wysokiej czułości poszukiwania cząstek spoza tego modelu.

Prowadzone są prace rozwojowe nad technikami akceleratorowymi i detektorami cząstek dla dwóch tego typu projektów: Międzynarodowego Zderzacza Liniowego ILC oraz Kompaktowego Zderzacza Liniowego CLIC w CERN-ie.

Jednym z najbardziej wymagających detektorów w eksperymencie CLIC jest detektor wierzchołka. Powinien on charakteryzować się pozycyjną zdolnością rozdzielczą lepszą niż 3  $\mu\text{m}$ , budżetem materiału poniżej 0.2% długości radiacyjnej i poborem mocy poniżej 50 mW/cm<sup>2</sup>. Dla spełnienia tych wymagań prowadzone są prace rozwojowe nad krzemowymi detektorami pikselowymi z wykorzystaniem popularnej w eksperymentalnej fizyce cząstek i stosunkowo dobrze rozwiniętej technologii detektorów hybrydowych, jak i znacznie rzadziej stosowanej technologii monolitycznej. Ta druga stwarza możliwości uzyskania niskiego budżetu materiału i uproszczenia budowy detektora poprzez zintegrowanie części detekcyjnej i elektroniki odczytu w jednej warstwie.

Grupa badawcza z Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, do której należy pani mgr. inż. Roma Bugiel, pracuje nad monolitycznym detektorem wierzchołka do eksperymentu CLIC opartym na technologii 200 nm Silicon-On-Insulator (SOI) CMOS oferowanej przez firmę Lapis Semiconductor. Grupa prowadzi prace obejmujące projekt detektora i elektroniki odczytu, przygotowanie oraz prowadzenie testów prototypów i analizę zebranych danych. Pani Roma Bugiel zaangażowana była zarówno w prace nad projektem prototypów detektora wierzchołka, jak i w testy. W swojej pracy doktorskiej skoncentrowała się na analizie wyników z testów dwóch prototypów, które przeprowadzone zostały na wiązce pionów w CERN-ie. Głównym celem tych testów było zweryfikowanie, czy prototypy są w stanie osiągnąć przestrzenną rozdzielczość wymaganą dla detektora wierzchołka w eksperymencie CLIC.

Praca składa się z pięciu rozdziałów opatrzonych streszczeniem, spisem stosowanych skrótów i wstępem, a także podsumowaniem, jednym dodatkiem zawierającym część wykresów z przeprowadzonych badań oraz spisem literatury.

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do tematyki pracy, zaczynając od prezentacji ogólnych zagadnień dotyczących programu badań na zderzaczu CLIC, poprzez opis projektu uniwersalnego układu detekcyjnego, który zostanie umieszczony w punkcie oddziaływania wiązek na zderzaczu, aż po przedstawienie krzemowego detektora wierzchołka stanowiącego najbardziej centralną warstwę układu detekcyjnego. Według obecnego projektu, detektor

wierzchołka składa się z trzech podwójnych cylindrycznych warstw zamkniętych na obu końcach trapezoidalnymi segmentami ułożonymi w spiralne dyski. Dla uzyskania wymaganej precyzji pomiaru pozycji wierzchołków, pozycyjna zdolność rozdzielcza dla pojedynczego punktu rejestrowanego w detektorze wierzchołka powinna być nie gorsza niż  $3\ \mu\text{m}$ , a budżet materiału dla warstwy detektora ograniczony jest do 0.2% długości radiacyjnej co odpowiada  $200\ \mu\text{m}$  krzemu. Ponadto, dla ograniczenia efektu pile-upu, konieczne jest znakowanie czasowe odpowiedzi detektora z rozdzielczością co najmniej 10 ns. Ze względu na niski budżet materiału i związaną z tym ograniczoną możliwość chłodzenia, zużycie mocy powinno być mniejsze niż  $50\ \text{mW}/\text{cm}^2$ . Dla spełnienia tych wymagań prowadzone są przez różne grupy prace rozwojowe nad detektorem wierzchołka oparte zarówno o bardziej tradycyjną technikę krzemowych detektorów pikselowych typu hybrydowego jak i mniej popularną w fizyce cząstek technikę detektorów monolitycznych. Opracowywane przez krakowską grupę detektory monolityczne produkowane są jako struktury typu *Silicon-On-Isolator* (SOI) CMOS. Taka struktura nadaje się bardzo dobrze do produkcji detektorów monolitycznych ze względu na możliwość zaimplementowania wysoko rezystywnego podłoża dla warstwy detekcyjnej, niezależnego od warstwy krzemu przeznaczonej na elektronikę.

W rozdziale drugim pracy przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z zasadą działania półprzewodnikowych detektorów śladowych. Podano najważniejsze informacje dot. oddziaływania cząstek naładowanych z materią. Omówiono kluczowe własności półprzewodników oraz złącza typu n-p. Przedstawiono dwa najpopularniejsze typy stopnia wejściowego elektroniki odczytu detektora: bufor oparty o wtórnik źródłowy oraz wzmacniacz ładunkowy. Oba rozwiązania zastosowano i wypróbowano w testowanych detektorach pikselowych.

W rozdziale trzecim przedstawiono szczegóły prototypowych detektorów pikselowych, których własności badane były w ramach pracy, oraz układ testowy wykorzystany do tych badań. Przetestowano dwa prototypy zaprojektowane – jeden w 2016, a drugi w 2017 roku. Każdy z nich zawierał dwie macierze  $8 \times 36$  pikseli, z pikselem o rozmiarach  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ . Odczyt pikseli w jednej macierzy oparty jest o wtórnik źródłowy (source followers – SF), a drugiej o przedwzmacniacze ładunkowe (charge-sensitive preamplifiers – CPA). Macierz pikseli odczytywanych przez przedwzmacniacze ładunkowe była podzielona na dwie równe podmacierze zawierające dwa różne rozmiary- małe i duże- diody zbierające ładunek, określane jako CPAsmall i CPAlarge. Dodatkowo, macierze pikseli wykonane były w dwóch wersjach – na dwóch różnych podłożach krzemowych: jedna na waflu krzemowym Floating Zone typu -n (FZ-n) o grubości  $500\ \mu\text{m}$ , a druga na waflu Double SOI typu p (DSOI-p) o grubości  $300\ \mu\text{m}$ . Odczyt kolejnych rzędów macierzy pikseli odbywał się w modzie „rolling shutter”. Częstota odczytu macierzy wynosiła 5,91 MHz, a dla prototypu z 2017 roku wypróbowano także dwa razy większą częstotliwość. Sygnały odczytywane z kolejnych rzędów pikseli buforowane były we wzmacniaczach różnicowych, a następnie przesyłane seryjnie do zewnętrznego, 12-bitowego ADC. Testy prototypów przeprowadzono w trakcie dwóch okresów pomiarowych w CERN-ie na akceleratorze SPS z wykorzystaniem wtórnej wiązki pionów o pędzie 120 GeV. Do rejestracji referencyjnych śladów pionów wykorzystano teleskop CLICdp składający się z siedmiu płaszczyzn detekcyjnych opartych o krzemowe detektory pikselowe Timepix3. Pozycyjna zdolność rozdzielcza teleskopu w płaszczyźnie testowanego prototypu wynosiła około  $2\ \mu\text{m}$ .

W rozdziale czwartym przedstawione zostały zastosowane metody analizy danych. Analiza składała się z trzech podstawowych procedur: rekonstrukcji śladów w teleskopie CLICdp,

znajdowania klastrow w testowanym detektorze i korelowania klastrow i sladow. Rekonstrukcja sladow odbywala sie w oparciu o dostepne oprogramowanie EU Telesope.

Do znajdowania klastrow przetestowano rozne algorytmy: metode oparta o zastosowanie dwuch progow dyskryminacji dla rejestrowanych na pikselach ladunkow (metoda 2TM), dwie metody pochodne – najwyzszych linii (2HLM) oraz trzech pikseli (3PM), a takze metody oparte o pojedynczy prog dyskryminacji i wyszukiwanie piksela dla ktorego zarejestrowano najwyzszy ladunek przekraczajacy prog oraz dodanie osmiu, czterech lub trzech pikseli (odpowiednio 9PM, CROS, 4PM). Dla wyliczenia pozycji sladow w oparciu o ladunki zarejestrowane dla pikseli klastra opracowano oryginalna metode bledaca uogolnieniem metody wykorzystujacej zalozenie o jednorodnym naswietleniu detektora do znalezienia pozycji sladu pomiedzy dwoma sasiednimi pikselami w funkcji tzw. zmiennej  $\eta$  zaleznej od ladunkow zarejestrowanych na tych dwuch pikselach. Zaproponowana metoda jest uogolnieniem procedury wyznaczania pozycji na wiele pikseli w klastrze. Zamiast zmiennej  $\eta$  stosowana jest srednia pozycja pikseli w klastrze wazona wartosciami zarejestrowanego na nich ladunku. Zalozenie o jednorodnym naswietleniu pozwala na znalezienie zwiazku pomiedzy srednia wazona, a pozycja sladu. Uzyskane ta droga rozklady pozycji klastrow dla danych z przeprowadzonych testow maja rozklad jednorodny, co potwierdza poprawnosc metody.

Korelacja klastrow zarejestrowanych w detektorze prototypowym ze sladem zrekonstruowanym w teleskopie odbywala sie w oparciu o roznicę pomiedzy znacznikami czasowymi odpowiadajacymi rejestracji sladu i rejestracji klastra. Spośród klastrow, ktore mieściły sie w ustalonym oknie czasowym w stosunku do sladu, jako skorelowany ze sladem wybierano ten, dla ktorego odleglosc wyznaczonego na jego podstawie punktu od sladu byla najmniejsza.

Ze wzgledu na zastosowanie odczytu macierzy pikseli wiersz po wierszu metoda „rolling-shutter”, wiersze macierzy, ktore w momencie przejścia czastki byly w fazie odczytu, nie rejestrowaly ladunkow. Jedynie sasiednie wiersze bledace w fazie calkowania ladunku mogly zarejestrowac czastke. W ten sposob, dla pewnego ulamka zdarzen rejestrowano jedynie czesc ladunku, a zrekonstruowana pozycja sladu miala gorsza dokladnosc niz dla przypadkow, dla ktorych rejestrowano caly ladunek. Maly ladunek i wieksza odleglosc od sladu zrekonstruowanego w teleskopie niz okreslona wartosc, posluzily do identyfikacji klastrow, zaburzonych odczytem pikseli. Dla takich zdarzen wystepuje korelacja pomiedzy numerem wiersza w macierzy, a czasem przejścia sladu zarejestrowanym przez teleskop. W konsekwencji roznicza czasu pomiedzy odczytem pierwszego wiersza w macierzy, a momentem przejścia sladu jest skorelowana z numerem wiersza, ktory jest odczytywany w momencie przejścia sladu. Ta roznicza czasu pozwala wiec na identyfikacje klastrow zaburzonych przez odczyt. Dzieki temu w trakcie analizy mozliwe bylo identyfikowanie takich klastrow. Robiono to przy wyznaczaniu rozdzielczosci przestrzennej prototypu.

Rozdzial piaty, najbardziej obszerny, zawiera prezentacje i dyskusje przeprowadzonej analizy danych z testow detektorow prototypowych na wiazce pionow.

W pierwszym kroku analizy wyznaczono poziom linii bazowych i szumow dla pikseli w macierzach. Wykorzystano do tego dane z pomiarow na wiazce odrzucajac zdarzenia w ktorych calkowity rejestrowany ladunek przekraczal pewna minimalna wartosc odpowiadajaca rejestracji czastki. Poziom szumow dla pikseli z odczytem przez wtorniki zdrojowe jest co najmniej dwukrotnie mniejszy niz dla odczytu przez przedwzmacniacze ladunkowe, co tłumaczy sie mniejszymi szumami wprowadzanymi przez elektronike. Szumy obserwowane przy czestosci odczytu 12,5 MHz sa nizsze niz przy czestosci 6 MHz co moze byc skutkiem krótszego czasu calkowania ladunku dla wyzszej czestosci. Szumy pikseli odczytywanych z wykorzystaniem przedwzmacniaczy ladunkowych sa nizsze dla macierzy na

podłożu FZ-n niż na podłożu DSOI-p. Dodatkowo, w tym drugim przypadku obserwuje się spadek szumów w funkcji zwiększanej napięcia polaryzacji w kierunku zaporowym.

Kolejnym krokiem analizy było wyznaczanie średniej wysokości sygnału z detektora, która jest proporcjonalna do straty energii cząstki. W tym celu sumowano zarejestrowane ładunki od wszystkich pikseli w klastrze i do rozkładu wartości tej sumy dopasowywano rozkład Landaua spleciony z rozkładem Gaussa, a następnie brano najbardziej prawdopodobną wartość dla rozkładu Landaua. Dla sensorów na podłożu FZ-n wartość sygnału rośnie w funkcji napięcia polaryzacji aż do osiągnięcia całkowitego zubożenia. W przypadku sensorów na podłożu DSOI-p nie stosowano napięcia polaryzacji wystarczającego dla osiągnięcia pełnego zubożenia, ze względu na pojawianie się niewyjaśnionych prądów upływu. Wartość stosunku sygnału do szumu jest najlepsza dla sensorów na podłożu FZ-n i dla odczytu z zastosowaniem wtórników źródła wynosi około 350, a w przypadku zastosowania przedwzmacniaczy ładunkowych jest równa około 250 dla dużych diod zbierających ładunek i 170 dla małych. Ponieważ dla sensorów na podłożu DSOI-p nie stosowano napięcia pozwalającego na pełne zubożenie, wartości stosunku sygnału do szumu była gorsza niż dla FZ-n.

Kolejny krok analizy dotyczył wyznaczenia wielkości klastrów w przypadku stosowania metody znajdowania klastrów opartej o dwa progi. Średnia wielkość klastrów jest stosunkowo duża i wynosi ok. 6-8 pikseli. Nie pojawiają się też klastry składające się z pojedynczych pikseli. Wyjątkiem są sensory na podłożu DSOI-p odczytywane przez wtórnik źródłowy dla których średnia wielkość klastra wynosi ok. 4 oraz obserwowane są odpowiedzi pojedynczych pikseli. Ciekawy efekt widoczny jest w kształcie zależności wielkości klastra w funkcji napięcia dla podłoża FZ-n. Dla napięć ok. 30 V, dla których nie osiąga się pełnego zubożenia, wielkość klastrów jest prawie dwa razy większa niż dla napięć powyżej 70 V odpowiadających pełnemu zubożeniu. W pracy podano jakościowe wytłumaczenie tego efektu, jako skutku dyfuzji nośników ładunku wytwarzanych w warstwie niezubożonej. W dyskutowanej zależności obserwuje się także szybki spadek wielkości klastrów dla napięć poniżej 20 V. Efekt ten nie jest rozumiany i wymaga dalszych badań.

Następnym etapem analizy było wyznaczenie wydajności detekcji będącej jednym z głównych parametrów charakteryzujących jakość działania detektora. Jako metodę znajdowania klastrów wybrano algorytm 4PM. Zaletą tego algorytmu jest stosunkowo mały rozmiar klastra, przez co prawdopodobieństwo „pile-upu” jest niewielkie. Dla sprawdzenia czy metoda wyszukiwania klastrów ma wpływ na wartość wydajności, dokonano porównania z wynikami dla metody dwuprogowej i nie stwierdzono istotnych różnic. Wyznaczone mapy wydajności w obszarze powierzchni detektora mają rozkład jednorodny. Nie obserwuje się spadków wydajności spowodowanych źle działającymi pikselami. Jednorodność rozkładów obserwuje się również na małych obszarach odpowiadających wielkości pikseli. W pracy nie skomentowano tego wyniku, ale być może wynika on z zastosowanej metody znajdowania pozycji w klastrze, opartej o założenie jednorodnego oświetlenia i świadczy o jej poprawnym działaniu. Dla sensorów na podłożu FZ-n, zależność wydajności od przyłożonego napięcia jest w przybliżeniu stała dla napięć większych niż 10 V i osiąga wartość powyżej 96%. Dla sensorów na podłożu DSOI-p odczytywanych przez układy przedwzmacniaczy ładunkowych z małymi diodami zbierającymi ładunek, dla napięć powyżej 10 V wydajność jest większa niż 94% natomiast dla odczytu z użyciem wtórnik źródłowych obserwuje się wolniejszy wzrost wydajności w funkcji napięcia, co wiąże się z małą wysokością impulsów dla małych grubości warstwy zubożonej. Jako główne źródło strat wydajności podany jest efekt „pile-upu” oraz czas martwy wprowadzany przez odczyt macierzy pikseli.

Ze względu na wysokie wymagania stawiane detektorom pikselowym jeśli chodzi o precyzję pomiaru pozycji śladów cząstek, kluczowym etapem przeprowadzonej analizy było zbadanie pozycyjnej zdolności rozdzielczej. Wyznaczano ją w oparciu o rozkład tzw. residuów czyli

różnic pomiędzy pozycją mierzoną w testowanym detektorze, a pozycją śladu zrekonstruowanego w teleskopie. Ostateczna pozycyjna zdolność rozdzielcza detektora jest wyliczona po odjęciu w kwadracie od odchylenia standardowego rozkładu residuów pozycyjnej zdolności rozdzielczej teleskopu, która wynosiła ok.  $2\ \mu\text{m}$ . W wyznaczonych rozkładach residuów, oprócz centralnego piku posiadającego w przybliżeniu gaussowski kształt, występują ogony rozkładu odbiegające od kształtu funkcji Gaussa i zawierające ok. 10% całej statystyki. Jako efekty, które mogą wnosić wkład do obserwowanych ogonów, wskazano „pile-up” klastrów oraz produkcję elektronów delta. Z wcześniejszych badań wydajności wynika, że „pile-up” występuje w danych z prawdopodobieństwem ok. 1-3%. Dla oszacowania przyczynku od elektronów delta wyselekcjonowano klastry, których rozmiar odbiega o dwa odchylenia standardowe od ich średniego rozmiaru. Stwierdzono, że dla tych klastrów, również strata energii odpowiada ogonowi rozkładu Landaua, a więc jest większa niż średnia strata, co potwierdza, że wybierane są w ten sposób klastry związane z elektronami delta. Tego typu klastry dają jedynie ok. 20% przyczynku do ogonów rozkładu residuów. Główny wkład do ogonów nie jest znany. Wysunięte jest przypuszczenie, że być może pochodzą one od ogonów rozkładu pozycji mierzonej przez teleskop. W momencie pisania pracy odpowiedź na to pytanie nie była znana, gdyż trwała szczegółowa analiza przestrzennej zdolności rozdzielczej teleskopu. Dla liczbowego wyznaczenia pozycyjnej zdolności rozdzielczej postanowiono zredukować wpływ ogonów rozkładu residuów poprzez dopasowanie funkcji Gaussa do 95.5% najbardziej centralnych zdarzeń w rozkładzie. Mając tak zdefiniowaną rozdzielczość przestrzenną detektora zbadano jej wartość dla różnych parametrów analizy i parametrów detektora. Ustalono, że zaproponowana metoda korekty pozycji śladu wyliczonej w oparciu o środek ciężkości rozkładu amplitud w klastrze, poprawia pozycyjną zdolność rozdzielczą. Stwierdzono również, że pozycyjna zdolność rozdzielcza zależy od zastosowanej metody klasteryzacji. Wskazano na metodę CROS, jako dającą dla większości przypadków najlepszą rozdzielczość. Zauważono, że zdolność rozdzielcza w kierunku x jest gorsza niż w kierunku y ze względu na efekt „cross-talku”. Dla sensorów na podłożu FZ-n uzyskano rozdzielczość ok.  $3\ \mu\text{m}$  i była ona lepsza niż dla podłoża DSOI-p, ale w tym drugim przypadku nie osiągnięto pełnego zubożenia. Najwyższą rozdzielczość, równą w najlepszym przypadku  $2.1\ \mu\text{m}$ , osiągnięto dla opcji odczytu opartej o wtórnik źródłowy. Stwierdzono, że dla tej opcji wysoka zdolność rozdzielcza jest uzyskiwana nawet dla niewielkiej grubości warstwy zubożonej równej  $150\ \mu\text{m}$ , co jest porównywalne z grubością detektora dla CLIC-a. Zauważono, że należy wziąć pod uwagę również dyfuzję nośników ładunku w warstwie detektora, która nie jest zubożona. Wskazano, że dla podłoża DSOI-p najlepszą zdolność rozdzielczą – ok.  $3.6\ \mu\text{m}$  - uzyskano dla opcji odczytu z przedwzmacniaczem ładunkowym i małymi diodami zbierającymi ładunek. Zasugerowano, że ta opcja powinna być brana pod uwagę w przypadku dalszego rozwoju sensorów na tym podłożu

Oceniając pracę stwierdzam, że jest napisana bardzo dobrze, szczególnie w jej zasadniczej części dotyczącej analizy danych testowych. Praca świadczy o zrozumieniu przez doktorantkę zagadnień fizyki detektorów pikselowych i metod opracowania odczytywanych z nich danych. Analiza danych testowych została przeprowadzona w sposób dogłębny i szczegółowy. Uzyskane wyniki są interesujące z punktu widzenia fizyki i techniki detektorów pikselowych i ważne dla realizacji detektora wierzchołka CLIC. Podstawowy cel pracy – sprawdzenie czy detektory prototypowe spełniają wymagania dla pozycyjnej zdolności rozdzielczej w detektorze wierzchołka CLIC lepszej niż  $3\ \mu\text{m}$  - został osiągnięty. Wyznaczona zdolność rozdzielcza dla macierzy pikseli na podłożu FZ-n odczytywanych z wykorzystaniem wtórników źródłowych wyniosła  $2.1\ \mu\text{m}$ . Należy jednak podkreślić, że zastosowana grubość podłoża ( $500\ \mu\text{m}$ ) jest większa niż wymagania dla CLICa ( $200\ \mu\text{m}$ ).

Do analizy danych opracowane zostały nowe metody i procedury. Szczególnie interesująca wydaje się metoda znajdowania pozycji śladu w oparciu o średnią pozycję pikseli w klastrze ważoną zarejestrowanymi ładunkami. Związek pomiędzy pozycją śladu a średnią uzyskiwany jest z danych eksperymentalnych przy założeniu jednorodności naświetlenia detektora. Jest to uogólnienie metody jednorodnego naświetlenia opisanej w literaturze dla przypadku dwóch pikseli.

W pracy przedstawiono wyniki bardzo wielu testów odpowiadających różnym parametrom detektora, warunkom pracy i metodom analizy. Pani Roma Bugiel bardzo dobrze poradziła sobie z ich prezentacją, dzięki przemyślanemu układowi pracy, a w szczególności rozdzielaniu na dwa odrębne rozdziały przedstawienia metod analizy i wyników analizy oraz podzieleniu rozdziałów na podrozdziały dobrze odpowiadające przedstawianym zagadnieniom. Pomocne dla czytelnika okazują się przypomnienia na początku niektórych rozdziałów czy podrozdziałów przyjętych definicji, a także podany na początku pracy wykaz skrótów i definicji kluczowych pojęć zamieszczone w tabeli 4.1 i 4.2.

Praca napisana jest jasnym, precyzyjnym językiem. Przed poruszeniem nowych zagadnień doktorantka wprowadza w nie czytelnika podając najistotniejsze ogólne informacje. Wyjaśnienia różnych obserwowanych efektów są przekonujące. Jedynym fragmentem tekstu, w którym zabrakło mi wystarczającego objaśnienia było zdanie czwarte na stronie 82 mówiące o wyznaczeniu prawdopodobieństwa „pile-upu” na podstawie częstości zliczeń przypadających na ramkę czasową. Nie jest dla mnie jasne jak wyliczono to prawdopodobieństwo.

Na wyróżnienie zasługują prezentowane w pracy wykresy z wynikami ze względu na czytelność i dopracowanie graficzne.

Praca jest starannie zredagowana. Znalazłem w niej jedynie kilka drobnych nieścisłości czy literówek:

- W polskiej wersji streszczenia mowa jest o „budzecie materiałowym nie większym niż 200  $\mu\text{m}$ ” nie podając rodzaju materiału (prawdopodobnie chodzi o krzem). Ta nieścisłość nie występuje w wersji angielskiej streszczenia, gdzie budżet materiału podano w jednostkach długości radiacyjnej.
- Na stronie 25 w linii 21 mowa jest o trajektoriach prostopadłych (When trajectories are perpendicular..), nie jednak jasne w stosunku do czego zachodzi ta prostopadłość. Z poprzedniego zdania można się domyślać, że chodzi o prostopadłość do elektrod.
- We wzorze 4.6 na stronie 53, indeks po lewej stronie powinien być  $\eta_0$ , a nie  $\eta$ .
- W Konkluzjach na stronie 100 mowa jest o technologii Lapis SOI CMOS 200  $\mu\text{m}$ , a powinno być 200 nm.

Te nieścisłości i literówki nie wpływają istotnie na wartość pracy.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska pani Romy Bugiel stanowi istotny wkład w dziedzinie rozwoju krzemowych detektorów pikselowych i w pełni spełnia warunki rozprawy na stopień doktora nauk fizycznych. W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie pani Romy Bugiel do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

