

Kraków, 20 września 2020 rok.

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

RECENZJA
pracy doktorskiej mgr. inż. Moniki Chudyby
pt. „Energetyczna zdolność rozdzielcza segmentowanych detektorów
półprzewodnikowych promieniowania X”

Krzemowe detektory promieniowania X zarówno te czułe na pozycję, jak i te służące do pomiaru energii, znalazły wiele zastosowań w nauce i technice ze względu na doskonałą, zależnie od rodzaju, pozycyjną lub energetyczną rozdzielczość.

Trwający rozwój tych detektorów jest stymulowany m.in. pojawianiem się coraz silniejszych źródeł promieniowania X i związanymi z tym wymogami prawidłowej pracy przy dużych natężeniach promieniowania oraz odporności na uszkodzenia radiacyjne.

W przypadku planarnych detektorów krzemowych wykorzystywanych do pomiaru energii, możliwą modyfikacją prowadzącą do poprawy zdolności pracy w wysokich strumieniach cząstek jest podzielenie powierzchni czynnej na niezależne segmenty i podłączenie każdego z nich do indywidualnego kanału elektroniki odczytu.

Zaletą takiego rozwiązania jest mała pojemność i mały prąd upływu dla pojedynczego segmentu skutkujące redukcją poziomu szumów. Nadmierne zmniejszanie wielkości segmentów prowadzi jednak do zwiększania efektów związanych z podziałem ładunku między sąsiednimi segmentami i skutkuje pogorszeniem energetycznej zdolności rozdzielczej. Dodatkową zaletą segmentowanych detektorów promieniowania X jest ich czułość na pozycję, dzięki czemu mogą znaleźć zastosowania tam, gdzie wymagany jest jednoczesny pomiar energii i pozycji, np. w pełnoobszarowej analizie fluorescencji rentgenowskiej.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska pani Moniki Chudyby poświęcona jest badaniom i optymalizacji własności segmentowanych detektorów krzemowych przewidzianych do rejestracji energii miękkiego promieniowania rentgenowskiego.

Celem pracy była analiza wykonalności pozycjoczułego detektora krzemowego charakteryzującego się wysoką energetyczną zdolnością rozdzielczą – poniżej 200 eV (FWHM) dla kwantów X o energii 5.9 keV.

Rozprawa doktorska przygotowana została w Katedrze Oddziaływań i Detekcji Cząstek na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, w której od wielu lat prowadzone są prace badawczo-rozwojowe nad nowoczesnymi detektorami cząstek i elektroniką do ich odczytu.

Rozprawa podzielona jest na dziewięć rozdziałów, pierwszy jest wstępem, a ostatni podsumowaniem.

Rozdział 2 i 3 stanowią wprowadzenie do fizyki detektorów półprzewodnikowych promieniowania X. Przedstawiają procesy oddziaływania promieniowania rentgenowskiego z materią oraz podstawowe własności najpopularniejszych półprzewodników, w szczególności krzemu, który został wybrany do budowy testowanych detektorów, a także własności złącz n-p i metal-półprzewodnik.

Rozdział 4 zawiera przegląd detektorów krzemowych czułych na pozycję. Przedstawiono w nim podstawowe własności detektorów paskowych. Opisano przykładowe realizacje

monolitycznych detektorów pikselowych wykonanych w technologiach CMOS, SOI CMOS i HVC MOS. Zaprezentowano budowę detektorów hybrydowych. Pokazano także zasadę działania detektorów typu CCD, detektorów krzemowych 3D oraz technologię tzw. aktywnych krawędzi sensora. Zaprezentowano najnowsze projekty pikselowych detektorów krzemowych rozwijanych na potrzeby rejestracji promieniowania rentgenowskiego ze źródeł synchrotronowych.

Rozdział 5 poświęcony jest teoretycznemu opisowi energetycznej zdolności rozdzielczej w detektorze półprzewodnikowym. Przedstawiono w nim przebieg prądu dziurowego i elektronowego dla impulsu prądowego odpowiadającego absorpcji kwantu promieniowania X w detektorze krzemowym opartym na złączu p⁺-n. Wyprowadzono wzór na ekwiwalentny ładunek szumowy (ENC) opisujący poziom szumów w układzie elektroniki czołowej wykorzystując odpowiedni szumowy schemat zastępczy dla detektora i elektroniki. Wzór ten wykorzystany został w dalszej części pracy do opisu poziomu szumów zaobserwowanych w przeprowadzonych testach detektorów prototypowych. Przedyskutowano także wpływ podziału ładunku między sąsiednie segmenty na energetyczną zdolność rozdzielczą. Przedstawiono najistotniejsze czynniki wpływające na energetyczną zdolność rozdzielczą segmentowanego detektora półprzewodnikowego.

W rozdziale 6 przedstawiono budowę prototypowych segmentowanych detektorów krzemowych opartych na złączu typu p⁺-n, które posłużyły do badań i optymalizacji energetycznej zdolności rozdzielczej przy rejestracji miękkiego promieniowania X. Detektory te składają się z krzemowego sensora i układu elektroniki odczytu. Sensory wyprodukowane z krzemu typu n zawierały z jednej strony kwadratowe pady z implantacją p⁺ i polami kontaktowymi do podłączenia elektroniki, a z drugiej strony płytką warstwę n⁺ służącą jako elektroda zbiorcza. Sensory wykonano w wielu różnych wersjach odpowiadających różnym grubościom warstwy krzemu (500 i 1000 μm), głębokościom implementacji p⁺ (1.2, 0.1 i 0.2 μm) i segmentacji kwadratowych padów (0.5, 0.75 i 1.0 mm) oraz odstępów między padami (50 i 100 μm). Na brzegach sensorów zastosowano pierścienie ochronne. W dalszej części recenzji powyższe detektory będą określane jako padowe zgodnie ze stosowaną konwencją nazewnictwa dotyczącą wielkości segmentów. Każdy pad podłączony jest techniką „wire-bonding” do indywidualnego kanału elektroniki odczytu obejmującego przedwzmacniacz, układ kształtujący, układ dopasowania poziomu bazowego, detektor szczytu impulsu, a także dyskryminator. Impuls z dyskryminatora z progiem ustawionym tak, aby odseparować sygnały od szumu, służył do wyzwolenia próbkowania napięcia w detektorze szczytu z wykorzystaniem przetwornika analogowo-cyfrowego.

Najbardziej obszerną i zarazem najistotniejszą część pracy stanowią rozdziały 7 i 8 przedstawiające odpowiednio przeprowadzone badania podstawowych własności, w tym energetycznej zdolności rozdzielczej i pomiary efektów uszkodzeń radiacyjnych prototypowych detektorów padowych. Wstępnym krokiem w tych badaniach była kalibracja energetyczna detektorów, którą wykonano opierając się na znanych energiach kwantów X z izotopu ⁵⁵Fe oraz promieniowania charakterystycznego chloru i tytanu wzbudzanego przez ten izotop. Badania przeprowadzono dla szeregu prototypowych detektorów różniących się wymiarami padów, odstępami między padami, grubością sensora krzemowego, a także głębokością implementacji p⁺. Testy prowadzono z wykorzystaniem izotopu ⁵⁵Fe, a energetyczną zdolność rozdzielczą prototypowych detektorów wyznaczano i porównywano jako szerokość w połowie wysokości dla linii 5.9 keV. Kluczową wielkością, którą porównywano dla testowanych prototypów był także poziom niskoenergetycznego tła. Dla testowanych detektorów różniących się m.in. wielkością padów, w co najmniej 94% przypadków kwanty X rejestrowane były na pojedynczym padzie. Udział przypadków z odpowiedzią dwóch sąsiednich padów był tym większy im mniejszy był rozmiar padu i im większy był odstęp między padami. Najlepszą energetyczną zdolność rozdzielczą dla zdarzeń

1-padowych bliską wartości 200 eV (FWHM) zaobserwowano dla detektorów z najmniejszymi rozmiarami padów i z najmniejszą odległością pomiędzy padami. Dla zdarzeń 2-padowych zdolność rozdzielcza była gorsza i dodatkowo widma energetyczne przesunięte były w kierunku niższych energii ze względu na efekt niekompletnego zbierania ładunku. Większość testów przeprowadzono w temperaturze pokojowej, ale dla jednego z prototypów zademonstrowano, że jego schłodzenie do temperatury ok. -10°C istotnie poprawia energetyczną zdolność rozdzielczą, co zinterpretowano jako efekt redukcji poziomu szumów śrutowych od prądu upływu sensora. Widma energetyczne zebrano dla kilku wartości napięć podawanych na sensory, przewyższających napięcie pełnego zubożenia wynoszącego ok. 100 V dla sensora o grubości 0.5 mm. Nie zauważono znaczących różnic w kształcie rejestrowanych widm. Do dalszych testów wybrano napięcie równe 300 V ze względu na lepszą energetyczną zdolność rozdzielczą niż dla niższych napięć, dla których występuje mniejsza wydajność zbierania ładunku. Przeprowadzone pomiary prądu upływu, dającego istotny wkład do szumów, wykazały jego większą wartość dla większego odstępu pomiędzy padami, co zinterpretowano jako wynik większego gradientu potencjału elektrycznego w regionach międzypadowych. Dokonano także pomiaru pojemności padów, która ma wpływ na poziom szumów napięciowych. Stwierdzono m.in., że większa pojemność padów odpowiada ich mniejszej odległości. Zbadano wpływ warstwy martwej występującej w obszarze p^+ pod kontaktami metalowymi na poziom tła niskoenergetycznego. Ustalono, że poziom tła jest ściśle związany z głębokością implementacji domieszek w obszarze p^+ . Przeprowadzono symulacje, które potwierdziły hipotezę, że tło niskoenergetyczne jest spowodowane niekompletnym zbieraniem ładunku w obszarze p^+ . Sprawdzono wpływ czasu kształtowania impulsu na energetyczną zdolność rozdzielczą. Dla trzech czasów kształtowania możliwych do ustawienia w wykorzystywanej elektronice odczytu, najlepszą energetyczną zdolność rozdzielczą uzyskano dla najdłuższego czasu kształtowania (3.5 μs), z czego wywnioskowano, że dominujący wpływ na rozdzielczość ma szum napięciowy.

W ramach badania odporności radiacyjnej detektora przeprowadzono pomiary wpływu dawek pochłoniętych promieniowania X z silnego źródła ^{55}Fe w zakresie do trzystu kilkudziesięciu Grej na podstawowe parametry detektora. Zaobserwowano znaczący wzrost prądu upływu i pogorszenie energetycznej zdolności rozdzielczej detektora. Zaobserwowano również anomalny wzrost prądu upływu i dalsze pogorszenie energetycznej zdolności rozdzielczej dla detektora pozostawionego w temperaturze pokojowej, bez napięcia polaryzacji na okres ok. półtora miesiąca. Efekt ten nie jest jednak dobrze zrozumiany.

Oceniając pracę stwierdzam jej wysoki poziom, w szczególności w jej zasadniczej części dotyczącej analizy i optymalizacji energetycznej zdolności rozdzielczej. Prezentowane pomiary i analizy przeprowadzone zostały wnikliwie i z bardzo dobrą znajomością badanych procesów. Pozwoliły one na wskazanie najważniejszych ograniczeń dla energetycznej zdolności rozdzielczej przy rejestracji miękkiego promieniowania X. Zademonstrowano, że padowe detektory krzemowe pozwalają na uzyskanie wysokiej rozdzielczości na poziomie 200 eV (FWHM) dla energii 5.9 keV. Należy podkreślić, że rozdzielczość ta jest bliska teoretycznie najwyższej rozdzielczości równej 121 eV (FWHM), wynikającej ze statystyki nośników ładunków produkowanych w detektorze przez zaabsorbowany kwant X. Najlepszą rozdzielczość uzyskano dla najmniejszego rozmiaru zastosowanych padów (500 μm \times 500 μm) i najmniejszego odstępu między padami (50 μm). Równie ważne wyniki uzyskano w pomiarach i interpretacji niskoenergetycznego tła, a w szczególności w pomiarze i opisie wpływu warstwy martwej w sensorach na poziom tego tła. Ważnym wynikiem jest również obserwacja efektów uszkodzeń radiacyjnych, które jak się okazuje, mogą wystąpić dla zastosowanej struktury detektora przy dawkach odpowiadających wykorzystaniu lamp rentgenowskich. Wyniki pracy stanowią solidną podstawę dla projektowania

segmentowanych detektorów krzemowych promieniowania X. Będą one pomocne dla osiągnięcia najlepszej rozdzielczości energetycznej projektowanego detektora przy zadanych wymaganiach i ograniczeniach. Wyznaczają także kierunek dalszych prac badawczo-rozwojowych, m.in. nad zastosowaniem padów o mniejszych rozmiarach dla dalszej poprawy energetycznej zdolności rozdzielczej oraz wykorzystaniem innego typu złącz dla osiągnięcia wyższej odporności na uszkodzenia radiacyjne.

Praca ma logiczny układ, napisana jest jasnym, precyzyjnym językiem.

Opis przeprowadzonych badań jest wystarczająco szczegółowy i kompletny.

Praca jest starannie zredagowana, aczkolwiek znalazłem się w niej kilka drobnych usterek i nieścisłości:

- Na rysunku 3.5 (b) zaznaczony linią przerywaną poziom Fermiego nie ma stałej wartości w poprzek złącza n-p, wbrew temu, co podaje pierwsze zdanie drugiego paragrafu na stronie 20.
- Na stronie 54, w zdaniu po wzorze 5.16 mowa jest o zastosowaniu przybliżenia $e^2 \approx 8$ w tym wzorze. Nie jest jasne dlaczego takie przybliżenie jest wprowadzane, gdyż we wzorze 5.16 ładunek elementarny e nie występuje w sposób jawny, a ponadto nie jest oczywiste, dlaczego kwadrat ładunku elementarnego przybliżać wartością liczbową 8. Może raczej chodzi o to, że przy wyprowadzeniu tego wzoru czynnik $e^2/8$ jest włączony do współczynników b , A_f i a opisujących przyczynki od różnego rodzaju szumów (?).
- Pierwsze zdanie na początku drugiego akapitu na str. 94 brzmiące „Wyindukowane prądy na elektrodzie odczytowej dla zostały scałkowane” wydaje się niekompletne.
- Pomiędzy rysunkami 7.24 A i B przedstawiającymi rozkład natężenia pola elektrycznego w sensorze odpowiednio dla głębokiej i płytkiej implementacji p^+ , trudna zauważyć jest jakiegokolwiek różnice. Brak widocznych różnic jest najprawdopodobniej wynikiem nieodpowiednio dobranej skali koloru. Dla uwidocznienia różnic pomocne mogłoby być także zastosowanie skali logarytmicznej dla wartości natężenia pola elektrycznego i dla głębokości, tak jak na rys. 7.24 C.

Usterki te nie wpływają istotnie na wartość pracy, którą oceniam jako bardzo dobrą.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska pani mgr inż. Moniki Chudyby stanowi istotny wkład w dziedzinie rozwoju półprzewodnikowych detektorów promieniowania X i w pełni spełnia warunki rozprawy na stopień doktora nauk fizycznych. W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie pani Moniki Chudyby do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

