

dr hab Andrzej Bożek prof. Instytutu
Particle Physics and Astrophysics Department
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
ul Radzikowskiego 152, Kraków

Kraków, 14 październik 2020

**Recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr inż. Moniki Chudyby zatytułowanej:
Energetyczna zdolność rozdzielcza segmentowanych detektorów półprzewodnikowych
promieniowania X**

Przedstawiona mi do recenzji praca, dotyczy badań nad rozwojem mozaikowych detektorów półprzewodnikowych do zastosowania w obrazowaniu promieniowania X.

Celem pracy było oszacowanie wykonalności krzemowego detektora z wysoką rozdzielczością energetyczną dla niskoenergetycznego promieniowania X. Głównym zastosowaniem tego typu detektorów było by rentgenowskie obrazowanie fluorescencyjne. Wymagane jest tu dobre pozycjonowanie jak i dobra rozdzielczość pozwalająca ograniczyć dawki aby nie zniszczyć badanego obiektu lub organizmu.

W chwili obecnej istnieją detektory używane do obrazowania promieniowania rentgenowskiego. Oparte po części na krzemowych detektorach hybrydowych jak i monolitycznych opracowanych na podstawie technologii używanej w Fizyce wysokich energii, nie w pełni zaadaptowanych do zastosowań niskoenergetycznych.

W praktyce istnieje potrzeba dostosowania do wymagań danego zastosowania. Ograniczenia technologiczne zmuszają do kompromisów pomiędzy różnymi parametrami detektorów takimi jak rozdzielczość przestrzenna, energetyczna oraz maksymalna intensywność promieniowania X. Istniejące detektory mają albo bardzo dobrą rozdzielczość przestrzenną lub bardzo dobre rozdzielczości energetyczne ale brak lub bardzo słabą rozdzielczością przestrzenną.

Praca pani mgr inż. Moniki Chudyba, składa się ze wstępu, siedmiu rozdziałów, podsumowania, rozbudowanej bibliografii zawierającej ponad sto pozycji i liczy 130 strony.

Wstęp jest bardzo ogólnym, ale w zupełności wystarczającym wprowadzeniem do tematyki pracy. Pokazuje w sposób przekonujący dlaczego autorka zajęła się tą tematyką i jej znaczenie dla rozwoju technik eksperymentalnych w wielu dziedzinach poczynając od biologii, materiałoznawstwie, geologii i kulturze. Brakuje tu omówienia która część przedstawionych badań zostały wykonane przez autorkę. Jedna drobna uwaga, czasami skróty są za pierwszym razem rozwijane i tłumaczone. Czasami jednak tak jak w przypadku szerokości połówkowej FWHM pojawia się on we wstępie bez wyjaśnień, jest on wytłumaczony później w tekście rozdziałów.

Rozdział drugi zawiera ogólne omówienie oddziaływania promieniowania energetycznego z materią. Autorka wprowadza tam pojęcia które później stosuje w pracy nie jestem do końca przekonany czy wymaga to osobnego, tak rozbudowanego rozdziału ale faktycznie pomaga to w zrozumieniu reszty pracy.

Rozdział trzeci, zatytułowany „Półprzewodniki jako materiały detektorowe” opisuje procesy odpowiedzialne za detekcję zbieranie ładunku w detektorach półprzewodnikowych.

W rozdziale czwartym autorka opisuje zasadę działania detektorów pozycjo-czułych.

W części piątej opisano teoretycznie zasady kierujące energetyczną rozdzielczością detektorów.

W następnym szóstym rozdziale autorka opisała budowę detektorów padowych wykorzystanych w badaniach. Niestety brakuje mi tu informacji wprost na temat grup które zaprojektowały te układy testowe. Taka informacja była by interesująca dla czytelnika. Jest odwołanie do noty wewnętrznej autorstwa promotora pomocniczego, w której jak rozumiem jest to wszystko opisane.

Tu następują dwa, merytoryczne rozdziały, opisujące główne kierunki badań, w których jest opisana praca wykonana samodzielnie przez autorkę.

W głównej części pracy, rozdziale 7, na prawie 40 stronach, autorka skupia się na optymalizacji zdolności rozdzielczej detektorów padowych.

W części 7.1 przedstawiona jest analiza sygnałów z detektora. Przedyskutowano tu także charakterystykę oraz podział na typy klastrów. Już z wykresu 7.1 widać że klastry dwu sygnałowe są znacznie rzadsze niż jedno sygnałowe, nie zostały jednak podane żadne dane ilościowe. Czytelnik się zastanawia dlaczego dyskutujemy nad przypadkami które są mało znaczące w ogólnej statystyce zamiast zostać odrzucone tak jak klastry trój sygnałowe. Dopiero na stronie 84 jest przedstawiona ilościowa analiza liczby klastrów jedno i dwu sygnałowych, gdzie w końcu po dyskusji autorka zdecydowała że będzie używała tylko klastrów zrekonstruowanych na jednym padzie. Przedyskutowano procedurę traktowania klastrów na brzegu detektorów, uzasadniając ich odrzucenie właśnie złą rekonstrukcją energii dla tego typu klastrów. Tłumacząc, słusznie, że ta procedura zmniejsza wydajność ale w podrozdziale 7.3 przyjęto że i tak tylko klastry pojedyncze, czyli takie które były odseparowane były używane do wyznaczania rozdzielczości energetycznej. Rozumiem że autorka chciała pokazać empirycznie proces wybory najlepszych warunków do oceny rozdzielczości energetycznej. jednak dyskusje na temat historycznych cięć jak z warunkami na brzegach detektora trochę utrudniają czytanie pracy.

Autorka pokazuje formułę 7.1 użytą do wydobycia szerokości połówkowej z widm energetycznych. Brakuje mi dyskusji tego wzoru. Co oznacza parametr RCS, czy jest on również dopasowywany, jest charakterystyką geometrii padów ? Trochę więcej informacji na temat oceny jakości dopasowania było by na miejscu.

Na rysunku 7.2 autorka pokazuje dopasowanie użytej formuły do widma i jak sama zauważa formuła nie opisuje rozkładu widma przed kalibracją. To samo widać na rozkładzie 7.5C danych po kalibracji. Wynika to między innymi z faktu że formuła ta nie ma ambicji odwzorować zachowania tła. Cecha tych odstępstw wskazuje że mogą one wpływać na wartość otrzymanych szerokości połówkowych. Później w tabelach 7.2 i 7.3 szerokości połówkowe są podane z dokładnością do pojedynczego elektronowolta, bez dyskusji błędu tego oszacowania. Prosiło by się tu porównanie przyjętej formuły z innym sposobami parametryzacji widm, tak aby móc, przynajmniej jakościowo jeżeli nie ilościowo, oszacować błąd systematyczny wyznaczania szerokości połówkowych.

Błędy pojawiają się w podrozdziale 7.2, poniżej jednego eV, ale są to tylko niepewności statystyczne.

Prosiło by się połączenie algorytmu Levenberga-Marquardta z modelowaniem tła niskoenergetycznego z podrozdziału 7.4. Mam wrażenie że umożliwiło by to na znaczną poprawę jakości wyznaczania tych szerokości. Pozwoliło by to na połączenie dwóch mocnych stron pracy, parametryzacji tła oraz procedury dopasowania sygnałów w jeden spójny mechanizm.

Podoba mi się opis procedury kalibracji, w moim rozumieniu jest on pełny i wystarczający.

W części 7.2 został przedyskutowany wpływ geometrii oraz parametrów pomiaru na zmierzoną szerokość połówkową. Jest to bardzo dobrze opisana procedura empirycznego badania z jasnym, pedagogicznym wstępem uzasadniającym wszystkie następujące po nim etapy.

- wpływ kierunku naświetlania,
- wpływ temperatury na rozdzielczość energetyczną,
- i napięcia polaryzacji.

Co ciekawe na rysunku 7.10 błędy są rzędu 10 eV. Wynika to z ze znacznie niższej statystyki tych widm którą widać z porównania rysunków 7.9 z 7.8. Ile trwało zbieranie pojedynczego widma ?

W rozdziale 7.3 opisano procedurę optymalizacji wymiarów detektora oraz segmentacji katody. Badano:

- wpływ segmentacji padów,
- prądów upływu,
- i pojemności.

Wyniki zostały zebrane w tabelach 7.2, 7.3 i 7.4. Dopiero tutaj pojawia się konkluzja że odrzucenie klastrów podwójnych polepsza rozdzielczość energetyczną o kilka elektronowoltów przy stosunkowo niewielkim spadku wydajności o 6%. Wydaje mi się że oba rozkłady mają inne niepewności systematyczne, jak widać rozkłady jedno i dwusygnałowe na rysunku 7.17 mają inne zachowanie tła poniżej peaków. Rozumiem że autorka sprawdziła że różnice w tych rozkładach nie wpływają znacząco na wyznaczenie szerokości połówkowej.

W następnym podrozdziale 7.4 zbadano efekt tzw. warstwy martwej na rozdzielczość. W badanych sensorach autorka potwierdziła wysokie tło nawet w przypadku odizolowanych klastrów 1 sygnałowych. Wynika to z powstawania warstwy niezubożonej pod kontaktami metalowymi tzw. warstwy martwej. Ładunek z tych obszarów nie jest zbierany ze względu na niskie natężenie pola elektrycznego. Wielkością tych obszarów można sterować zmieniając napięcie polaryzacji oraz głębokością implementacji.

Autorka wykonała pomiary efektu warstwy martwej dla rozdzielczości energetycznej peaku 5,9 keV w zależności od głębokości implementacji Wyniki zostały zebrane rysunkach i omówione ilościowo. Widoczne jest też zmniejszenie tła przy płytszej implementacji. Wynik, bardzo jednoznaczny, jest jednym z głównych wyników tej pracy. Daje wskazówki co na temat jakiej technologii należy użyć przy projektowaniu detektorów o dobrej zdolności rozdzielczej dla małych energii.

Wykonano również bardzo spektakularnych symulacji tego efektu w oparciu o metodę rozwiniętą kilka lat temu w pracy doktorskiej promotora pomocniczego. Końcowy wynik tej symulacji potwierdza hipotezę, że graniczny poziom tła niskoenergetycznego pochodzi od warstwy martwej sensora. Stąd konkluzja że dalsze poprawienie stosunku sygnału do tła będzie wymagało modyfikacji technologii wykonania złącza.

W następnym podrozdziale, 7.5, autorka zbadła wpływ elektroniki odczytu na energetyczną zdolność rozdzielczą.

Zbadano wpływ narastania sygnału przedwzmacniacza wraz z zależnością od temperatury elektroniki. Badania te wykonano dla różnej wielkości padów. Widać oczekiwane zależności, ich wpływ jest jednak mniejszy od innych przyczynków takich jak niepełne zbieranie ładunku.

W ósmym rozdziale, także wykonanym samodzielnie przez autorkę, opisuje ona badanie wpływu uszkodzeń radiacyjnych na rozdzielczość.

Degradacja detektorów promieniowania X wskutek napromieniowania wynika głównie z promieniowania jonizacyjnego w przeciwieństwie do detektorów używanych w fizyce wysokich energii.

Autorka badała wpływ dawek do kilkuset Gy. Są to ciągle dawki małe w stosunku do oczekiwanych na fabrykach promieniowania synchrotronowego. Zbadano charakterystyki prądowo napięciowe i rozdzielczość energetyczną. Na wykresie 8.6 autorka zebrała zmianę szerokości połówkowej w zależności od dawki a później od czasu. Zaobserwowano, nie intuicyjny, efekt pogorszenia parametrów po zakończeniu naświetlania, tzw. odwrotnej anilacji. Z dyskusji jakościowej wynika że obserwujemy złożenie obu procesów anilacji oraz odwrotnej anilacji. przy czym dopiero przy długich czasach anilacja zaczyna być znacząca.

Podobne zachowanie obserwujemy dla prądu upływu (rysunek 8.8). Na ewolucji prądu upływu widać wyraźnie złożenie oby procesów anilacji i prawdopodobną zależność temperaturową tego procesu. Pomiar prądu jest obarczony mniejszym błędem niż rozdzielczości energetycznej, zastanawiam się czy nie udało by się z tych wykresów otrzymać charakterystycznej krzywej rozpadu dla obu procesów. Byłby to ciekawy przyczynek do modelowania procesu zniszczeń radiacyjnych od niskoenergetycznego promieniowania X.

W konkluzji rozdziału autorka zauważa, że płytsza implementacja ze względu na odwrotną anilację powinna być bardziej czuła na duże dawki promieniowania. Z wykresów wynika że należy naświetlać od strony padów aby zmniejszyć degradację widm i rozdzielczości energetycznej. Ciągłe jednak tolerancja na napromieniowanie jest za mała aby móc stosować detektory w tej technologii w fabrykach promieniowania synchrotronowego.

Z drugiej strony, jak rozumiem, do badań fluorescencyjnych detektory nie muszą mieć wysokiej odporności radiacyjnej.

W podsumowaniu Autorka omawia najistotniejsze wyniki swoich badań, analizę zjawisk mogących wpływać na degradacje energetycznej zdolności rozdzielczej. Podkreśla zgodność z przewidywaniami analitycznymi co pozwala na optymistyczne założenie że można skalować modele także na inne, nie testowane, geometrie detektora czy typy elektroniki odczytu.

Autorka podkreśla jako najważniejszy wynik z pracy, weryfikację hipotezy istotnego wpływu martwej warstwy detektora na poziom tła w niskoenergetycznej części spektrum. Jak zauważa pani Chudyba efekt jest znany w detektorach wyspecjalizowanych w spektroskopii z wysoką rozdzielczością ale nie był zbadany dla detektorów mozaikowych.

Pani Chudyba opisuje też swoje wyniki dotyczące naświetlania detektorów oraz obserwację efektu odwrotnej anilacji po naświetleniu. Wyniki otrzymane w pracy potwierdzają możliwość zbudowania detektorów obrazujących w spektrum promieniowania rentgenowskiego z bardzo dobrą rozdzielczością spektralną nawet poniżej 200 eV.

Autorka wymienia interesująca listę możliwości rozszerzenia analizy na inne moduły detekcyjne, innej optymalizacji segmentacji detektora oraz typów łącza. Także sygnalizuje możliwość użycia innych materiałów niż krzem. Szkoda że pani nie rozwinęła tego paragrafu tak aby czytelnikowi naświetlić perspektywy oraz realność tych badań. Mogła by w ten sposób popisać się swoją wiedzą jak i perspektywami dziedziny w której piszę prace. Długość pracy jest stosunkowo duża ale dodatkowa strona w nawiązaniu do wstępu gdzie te inne technologie są opisane dopełniły by całą pracę.

W konkluzjach spędziłbym więcej czasu na omówienie wyników związanych ze szkodami radiacyjnymi. Jak autorka sygnalizowała może być to najważniejsze ograniczenie w wykorzystaniu takich detektorów na wiązkach synchrotronowych. Miałem nadzieje że jako laik dowiem się jakie są obecnie trendy w rozwoju detektorów krzemowych odpornych na środowisko wysokiej intensywności promieniowania X.

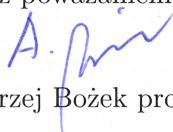
Praca wyróżnia dobrą redakcją, poza naprawdę drobnymi wpadkami. Została napisana zrozumiałym i bardzo poprawnym językiem. Podoba mi się fakt że autorka używa w sposób intensywny bibliografię. Doceniam też prace włożoną w spis oznaczeń, na czterech stronach zebrane są większość skrótów użytych w pracy. Wydać mi się że dla czytelności pracy skrót jeżeli się pojawia po raz pierwszy powinien być albo rozwinięty, w tekście notatce na dole strony lub odwołaniu do spisu oznaczeń. Także opisanie RCS w spisie jako parametru opisującego wielkość podziału ładunku nie jest wystarczające, nie jest to również wyjaśnione w tekście. Jako że praca została napisana w języku polskim prosiło by się używać konwencji z języka polskiego, gdzie część niecałkowita jest rozdzielona od bardziej znaczących cyfr przecinkiem. Używa pani slangu zawodowego, który nie jest dla mnie zawsze naturalny tak jak: quasi diracowski sygnał czy wakancja (która zresztą jako słowo pochodzące z łaciny pisze się przez s)

Rozprawa doktorska dowodzi, że autorka zdobyła doświadczenie w operowaniu warsztatem doświadczalnym, teoretycznym, jaki modelowym z dziedziny. Długi wstęp do pracy w pięciu rozdziałach pokazuje zrozumienie fizyki detektorów półprzewodnikowych oraz prawdopodobne zaciecie pedagogiczne.

Za najważniejszą cechę tej pracy uważam że pokazano że istniejące techniki modelowania, używane do opisu detektorów promieniowania X, są na tyle precyzyjne że możemy je stosować do opisu nowych detektorów mozaikowych o dużej rozdzielczości energetycznej. Dogłębny opis pomiarów w rozdziałach 7 i 8 oraz porównania z symulacjami są najważniejszymi wynikami z tej pracy. Opracowane metody doświadczalne pomogą w ewaluacji przyszłych projektów detektorów promieniowania X. Szkoda że autorka nie przedstawiała częściej wyników swoich badań w społeczności, czy to w postaci publikacji lub wystąpień konferencyjnych. Wydaje mi się że są one na tyle wartościowe i pomagają posunąć naszą wiedzę w kierunku przygotowania doskonalszych detektorów. Mam również nadzieje że Autorka jak i grupa dalej rozwija prace nad tego typu układach w kierunkach zasygnalizowanych w konkluzjach pracy.

Reasumując stwierdzam, że przedłożona praca spełnia wszelkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie pani mgr inż. Moniki Chudyba do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

z poważaniem



dr hab Andrzej Bożek prof. IFJ PAN