

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 25 października 2016 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 8 listopada 2016 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

mgr inż. Andrzeja Rychtera

temat: „Measurement Based Charactersation and Modelling of Micropixel Avalanche Photodiodes”

promotor – dr hab. inż. Janusz Marzec, prof. Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

prof. dr hab. inż. Marek Moszyńskiego z Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku
prof. dr hab. inż. Leszka Dobrzańskiego z Instytutu Technologii Elektronowej

Obrona odbędzie się w dniu 8 listopada 2016 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz.9.00 .

Po adresem: www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje zapewniony jest na stronie Wydziału dostęp do tekstów streszczenia rozprawy i recenzji, jak również do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

Autor pracy: Andrzej Rychter

Promotor: prof. nzw. dr hab. inż. Janusz Marzec

Tytuł: "Measurement Based Characterisation and Modelling of Micropixel Avalanche Photodiodes"

Streszczenie po angielsku:

This dissertation contains a detailed research of new types of Silicon Photomultipliers which have been developed at the beginning of this century. The author was responsible for measuring new types of silicon photomultipliers (SiPM) which were planned to be used as photosensors in the new calorimeter—ECALO in COMPASS experiment in CERN. The prototype of the calorimeter was equipped with Micropixel Avalanche Photodiodes (MAPD detectors from Zecotek), the final detector uses MPPC S12572-010 photosensors from Hamamatsu.

First chapter contains a detailed description of both detectors and examples of their usage in high energy physics experiments. To perform measurements and simulations of detectors, a special automated system with low noise front-end electronics has been designed. The thesis contains a description of the system which consists of three subsystems: low noise front-end electronics with data acquisition system, light source and light spot positioning system and temperature regulation system. Work contains a detailed description and schematic of discrete-elements-based charge sensitive amplifier (CSA). Electrical models of both MAPD and MPPC detectors have been proposed and confirmed with electrical measurements of impedance. A set of histogram based measurements has been performed. The main measured parameters are: electron gain, dark rate, relative photon detection efficiency and correlated noise. A new quenching mechanism of MAPD detector was a motivation to measure and analyse the recovery time. The results have shown that MAPD has very long recovery time and non-exponential recovery characteristic. Electron gain measurements showed that electron gain calculated from dark pulses is smaller due to long recovery time. A special care has been taken to measure the parameters uniformity of detectors. One chapter contains results of spacial distribution of parameters measured with both CSA and fast amplifier. Results of scans with histogram collection showed that the PDE (Photon Detection Efficiency) of MAPD is changing over the surface of the detector. Scans of signal shape revealed that the shape of the MAPD signal is dependent on the position of light flux due to thin contact layer. The simulation of contact layer has been performed and compared with measurement data. A big part of this thesis is a model description and Monte Carlo simulations of Geiger discharge probability in SiPM detector. The model has been based on the MPPC detector. The simulation results contain Geiger discharge probability dependency on the applied supply voltage and the position of primary charge and spectral sensitivity simulation of the model.

The results of this work could be very useful for experiments willing to use new types of SiPM photosensors in new detectors systems.

Streszczenie po polsku:

Rozprawa doktorska zawiera dokładną analizę nowych rodzajów wielopikselowych fotodiod lawinowych (SiPM ang. Silicon Photomultiplier). Głównym zadaniem autora była pomiarowa charakteryzacja nowych detektorów SiPM, które zostały zaplanowane jako detektory światła w nowym kalorymetrze ECALO w eksperymencie COMPASS w CERN. Prototyp kalorymetru został wyposażony w detektor MAPD firmy

Zecotek (MAPD ang. Micropixel Avalanche Photodiode), jednak ostatecznie w kalorymetrze użyto detektorów MPPC (ang. Multipixel Photon Counters) firmy Hamamatsu.

W początkowym rozdziale autor charakteryzuje oraz porównuje oba typy detektorów światła, przedstawia także ich zastosowania w eksperymentach fizyki wysokich energii. Aby wykonać odpowiednie pomiary oraz przeprowadzić symulacje detektorów, został zaprojektowany i zbudowany specjalny, zautomatyzowany system z niskoszumnym wzmacniaczem ładunkowym zbudowanym w oparciu o elementy dyskretne. Praca zawiera szczegółowy opis systemu, który składa się z: niskoszumnej elektroniki front-end z systemem akwizycji danych, systemu pozycjonowania wiązki światła na powierzchni detektora oraz systemu stabilizacji temperatury. Późniejsze rozdziały zawierają szczegółowy opis pomiarów obu detektorów: MAPD i MPPC. W oparciu o pomiary impedancji, zaproponowane zostały modele elektryczne obu detektorów. Kolejny rozdział przedstawia pomiary oparte o analizę histogramów amplitud odpowiedzi. Głównymi parametrami, które zostały zmierzone są: wzmocnienie elektronowe, szum ciemny, wydajność detekcji oraz szum skorelowany. Nowy mechanizm gaszenia lawiny Geigera w detektorze MAPD był główną motywacją do przeprowadzenia pomiarów czasu relaksacji. Pomiary wykazały, że czas relaksacji detektora MAPD jest bardzo długi, a jego kształt nie jest wykładniczy. Pomiary wzmocnień elektronowych dla impulsów ciemnych wykazały mniejsze wzmocnienie niż w przypadku oświetlenia słabymi sygnałami świetlnymi, jest to wynik długiego czasu relaksacji. Szczególną uwagę zwrócono na pomiary parametrów detektora w zależności od miejsca padania wiązki światła. Jeden z rozdziałów zawiera wyniki pomiarów jednorodności parametrów detektora MAPD z wykorzystaniem zarówno niskoszumnego wzmacniacza ładunkowego, jak i szybkiego wzmacniacza do pomiarów kształtu sygnału. Pomiary wydajności detekcji wykazały, że nie jest ona jednakowa na całej powierzchni detektora, a spada nieznacznie w obszarach pomiędzy pikselami. Pomiary jednorodności kształtu sygnału ujawniły wpływ cienkiej warstwy kontaktowej na szerokość impulsu. Ostatni rozdział pracy opisuje model oraz symulacje Monte Carlo prawdopodobieństwa wystąpienia wyładowania Geigera w detektorze MPPC. Przedstawiono wyniki symulacji prawdopodobieństwa wywołania lawiny Geigera w funkcji napięcia zasilania oraz pozycji pierwszej pary elektron-dziura w obszarze zubożonym. Kolejna symulacja dotyczy zależności prawdopodobieństwa wyładowania Geigera w funkcji długości padającej fali.

Wyniki tej pracy: pomiarowa charakteryzacja oraz zaproponowane modele detektorów mogą być bardzo przydatne dla eksperymentów, które planują korzystać z nowych rodzajów detektorów SiPM.

**KWESTIONARIUSZ- RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

**Tytuł rozprawy: Measurement Based Characterisation and Modelling of Micropixel
Avalanche Photodiodes**

Autor rozprawy: mgr inż. Andrzej Rychter

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Rozprawa doktorska Pana Andrzeja Rychtera powstała w ramach prac prowadzonych nad kalorymetrem ECAL0 w eksperymencie COMPASS w CERN w Genewie. Głównym zadaniem Autora była pomiarowa charakteryzacja nowych fotodetektorów, tzw. fotopowielaczy krzemowych (silicon photomultipliers, SiPMs), jako detektorów światła z scyntylatorów w kalorymetrze. Badania objęły dwa typy detektorów, MAPD (Micropixel Avalanche Photodiodes) firmy Zecotek, zastosowanych w prototypie modułu kalorymetra oraz MPPC (Mutipixel Photon Counters) firmy Hamamatsu, zastosowanych ostatecznie w kalorymetrze. Warto dodać, że w detektorze MAPD firma Zecotek stosuje nową strukturę SiPM, różniącą się zasadniczo od struktur SiPM, szeroko badanych w różnych ośrodkach naukowych i oferowanych przez inne firmy.

Celem badań prowadzonych przez mgra Rychtera, podsumowanych w rozprawie doktorskiej, było eksperymentalna charakteryzacja detektorów MAPD w porównaniu do klasycznych SiPM reprezentowanych przez detektory MPPC firmy Hamamatsu. Badania eksperymentalne zostały uzupełnione symulacjami Monte Carlo detektorów MPPC. Warto podkreślić, że prowadzone badania detektorów MAPD są pierwszymi, tak kompleksowymi, w literaturze światowej.

Rozprawa doktorska mgra inż. Andrzeja Rychtera ma charakter doświadczalno-eksperymentalny, co odzwierciedla się dobrze w jasno sformułowanych tezach rozprawy.

- 2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Rozdział 2 rozprawy poświęcony jest przeglądowi literatury związanej z zagadnieniami diskutowanymi w rozprawie. Autor stanął przed poważnym problemem, co wybrać z setek, a może tysięcy prac poświęconych SiPM, opublikowanych w ostatnich 10 – 15 latach.

W tej sytuacji, również ocena wyboru cytowanych prac staje się subiektywna. Brakuje mi np. prac z zakresu badań i zastosowań matryc SiPM w spektrometrii gamma z scyntylatorami, w tym cytowań prac publikowanych przez naszą grupę w JINST, NIMA i IEEE TNS. Tabela 2.1 prezentująca główne własności fotodetektorów MAPD firmy Zecotek powinna być rozszerzona o porównanie z podobnymi parametrami detektorów MPPC firmy Hamamatsu. Brak mi w Tabeli 2.1 rozmiaru detektorów, danych o czułości spektralnej, typowego napięcia polaryzacji, czy danych o ciemnym

prądzie. Lista takich parametrów pozwoliłaby już wstępnie przedyskutować porównanie SiPM.

W dyskusji zakresu dynamicznego SiPM brakuje zaznaczenia wpływu czasu martwego pikseli i czasu trwania impulsu świetlnego. W spektrometrii gamma z scyntylatorami liniowość odpowiedzi kryształu CsI(Tl) jest znacznie lepsza niż np. LSO stosowanego w tomografii pozytonowej. Wynika to z znacznie dłuższego czasu zaniku impulsu w CsI(Tl).

Prezentacja kalorymetru ECAL0 jest zbyt zwięzła. Miałem np. kłopot ze znalezieniem w tekście typu scyntylatora stosowanego w kalorymetrze. Szkoda, że Autor nie umieścił tabeli z parametrami scyntylatora. Również szkoda, że nie podał charakterystyk włókien scyntylacyjnych oraz szacowanej/mierzonej liczby fotonów na wyjściu włókien odczytywanych przez SiPMy. Te charakterystyki mogły mieć również wpływ na wybór typu fotodetektora.

Autor cytuje w rozprawie 68 pozycji z literatury światowej obejmujących różnorodne zagadnienia dotyczące własności SiPM i technik ich charakteryzowania oraz zastosowań SiPM w fizyce i medycynie nuklearnej, w tym 5 pozycji własnych Autora.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Badania detektorów MAPD i MPPC obejmowały badania elektryczne z wykorzystaniem analizatora wektorowego, pomiary widm amplitudowych (histogramów), pomiary kształtu impulsów z detektorów oraz czasów martwych pikseli. Ponadto, testy objęły skaning pozycyjny detektorów pozwalający ocenić równomierność detektorów i pikseli. W tym celu Autor zbudował system pozwalający na automatyczną kontrolę napięcia polaryzacji SiPM, stabilizację termiczną, system kontrolujący impulsy oświetlające fotodetektor oraz przesuw oświetlanego obszaru. Zapewniło to dużą dokładność i powtarzalność pomiarów różnych parametrów. Badania, głównie detektorów MAPD, zostały uzupełnione symulacjami Monte Carlo prawdopodobieństwa wystąpienia wyładowania Geigera w detektorach MPPC Hamamatsu. Wynikało to z prostszej konfiguracji tych detektorów umożliwiającą dobrą symulację. Detektory MAPD mają bardziej złożoną budowę, trudną do analizy metodami Monte Carlo.

Praca zawiera szczegółowy opis pomiarów badanych detektorów. W szczególności w oparciu o pomiary impedancji zaproponowane zostały modele elektryczne obu detektorów. Pomiary widm amplitudowych (histogramów) pozwoliły określić wzmocnienie elektronowe, prąd ciemny, wydajność detekcji oraz szum skorelowany. Zrozumienie nowego mechanizmu gaszenia lawiny w detektorach MAPD wymagało przeprowadzenia pomiarów czasu relaksacji. To pokazało poważne ograniczenie detektorów MAPD wynikające z bardzo długiego czasu relaksacji odzwierciedlone mniejszym wzmocnieniem dla wielofotonowych sygnałów.

Prowadzone badania pozwoliły, po raz pierwszy, na szczegółową charakteryzację detektorów MAPD oraz na zrozumienie ich ograniczeń. Warto podkreślić, że detektory MAPD były zastosowane tylko w module prototypowym kalorymetru. Wykryte ograniczenia w ich pracy spowodowały zastosowanie w kalorymetrze detektorów MPPC firmy Hamamatsu.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalnym wkładem Autora rozprawy są głównie szczegółowe badania detektorów MAPD firmy Zecotek. Wyniki badań obejmują:

- Opracowanie modelu elektrycznego detektorów MAPD
- Zaobserwowanie niższego wzmocnienia detektora MAPD dla sygnałów szumowych (1 phe) niż dla sygnałów wielofotonowych.
- Wykrycie bardzo długiego czasu powrotu pikseli w detektorach MAPD, sięgającego setek mikrosekund oraz znalezienie korelacji niższego wzmocnienia z bardzo długim czasem powrotu pikseli. Efekt ten zdyskwalifikował zastosowanie MAPD w kalorymetrze ECAL0,

w eksperymencie COMPASS na rzecz MPPC firmy Hamamatsu, o bardzo szybkim czasie powrotu, rzędu 30 ns.

- Badania pokazały, że wzmocnienie elektronowe MAPD odzwierciedla tylko część ładunku generowanego w procesie wyładowania Geigera. W efekcie Autor zaproponował model wzmocnienia elektronowego MAPD.
- W pomiarach odpowiedzi detektora MAPD pokazano, że kształt impulsu wyjściowego zależy od miejsca oświetlenia detektora. Autor wiąże to z cienkim kontaktem p^+ na powierzchni piksela. Ten wniosek został potwierdzony w modelu opartym o symulacje.
- Uzupełnieniem badań detektorów MAPD były symulacje Monte Carlo prawdopodobieństwa wystąpienia wyładowania Geigera w detektorze MPPC oraz zaproponowany model tego procesu.

Wyniki Autora mają dużą wartość poznawczą. Niewątpliwie były jednym z ważniejszych argumentów w decyzji o budowie kalorymetru CAL0 w oparciu o detektory MPPC w eksperymencie COMPASS w CERN.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Struktura pracy i poszczególne rozdziały są poprawne i jasno przedstawiają metodyki badań i cząstkowe wyniki.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Celem rozprawy mgra Rychtera była charakteryzacja nowych krzemowych fotopowielaczy MAPD firmy Zecotek, w porównaniu do klasycznych detektorów MPPC firmy Hamamatsu. Ale tak naprawdę, Autor przedstawił bogate testy eksperymentalne detektorów MAPD i bardzo ograniczone wyniki dla detektorów MPPC. Z kolei symulacje zostały przeprowadzone tylko dla MPPC. Wyniki badań wskazują na poważne ograniczenia MAPD, ale czytelnikowi brakuje systematycznego porównania własności MAPD i MPPC. Po przeczytaniu rozprawy czytelnik wie, że MAPD ma szereg ograniczeń, wie, że jest gorsze od MPPC, ale tak naprawdę czytelnik nie wie, co jest wadą MAPD, a co zaletą MPPC. Tak, jak brakowało mi w częściach wstępnych tabeli porównującej parametry obu detektorów oparte o dane producentów, tak brakuje mi tabeli, w której Autor podsumowałby numerycznie zrobione przez siebie testy porównawcze.

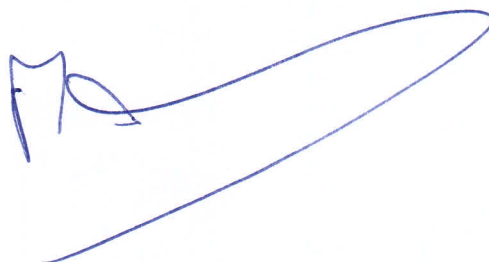
7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Główny cel rozprawy, charakteryzacja krzemowych fotopowielaczy firmy Zecotek w porównaniu do detektorów MPPC firmy Hamamatsu ma największe znaczenie dla zastosowań takich detektorów w eksperymentach fizyki wysokich energii. Pozwoliło wybrać jednoznacznie detektory MPPC dla kalorymetru CAL0 w eksperymencie COMPASS w CERN. Natomiast metodyka badań porównawczych, zbudowana aparatura pomiarowa ma potencjalne znacznie szersze zastosowanie i może być użyta w innych dziedzinach technik detekcyjnych.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

Reasumując, badania prowadzone w ramach pracy doktorskiej mgra Rychtera stoją na wysokim poziomie naukowo-technicznym. Autor wykazał dobre przygotowanie i znajomość przedmiotu rozprawy oraz duży talent konstrukcyjny i eksperymentatorski. Niestety samo porównanie badanych detektorów przedstawione w rozprawie wzbudza pewien niedosyt.

Rozprawę doktorską oceniam jako **dobrą, spełniającą** wymagania stawiane rozprawom i
wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do obrony publicznej.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized initial 'M' followed by a long, sweeping horizontal stroke that curves upwards at the end.

Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych
Politechniki Warszawskiej

Tytuł rozprawy: Measurement Based Characterisation and Modelling
of Micropixel Avalanche Photodiodes
Autor rozprawy: mgr inż. Andrzej Rychter

Rozprawa ma charakter doświadczalny metrologiczny, a ponadto teoretyczny w części poświęconej symulacji i modelowaniu detektorów.

Sposób rozwiązywania zagadnień naukowych nie ma charakteru dowodzenia prawdziwości twierdzeń – tez. We wprowadzeniu – abstrakcie mamy spis zagadnień i przedstawione są skrótowo osiągnięte wyniki, natomiast zapis o charakterze kategoriycznych stwierdzeń – tez pojawia się w ostatnim siódmym rozdziale zatytułowanym Conclusions.

Nie dostrzegam niejednoznaczności w opisie prac i następnie prezentacji tez z wyjątkiem sformułowania podanego na stronie 10, w którym autor określa główną motywację rozprawy jako opracowanie modeli fizycznych dwóch detektorów MPPC i MAPD, podczas gdy główny nakład pracy i osiągnięte wyniki dotyczą modeli elektrycznych, a nawet elektrycznych behawioralnych.

W rozprawie rozpatrzono następujące zagadnienia:

- 1) Zaprojektowano i wykonano układy pomiarowe (wzmacniacz ładunkowy i układy kształtowania impulsów, układ źródła światła i mikro-pozycjonowania światła, układ stabilizacji temperatury).
- 2) Przedstawiono modele elektryczne MPPC i MAPD i określono ich parametry.
- 3) Zmierzono i przeanalizowano czas powtórznego ładowania złącza piksela (*recovery time*).
- 4) Poprzez mapowanie (*scan*) określono jednorodność parametrów MAPD.
- 5) Zaproponowano model elektryczny warstwy kontaktowej p+.
- 6) Wykonano symulację MC detektora MPPC i określono parametry elektrycznego modelu behawioralnego.

Naukowe wnioski lub tezy rozprawy są następujące:

- 1) Wzmocnienie elektronowe określone ze zliczenia impulsów ciemnych jest istotnie mniejsze od określonego dla impulsów jasnych czego przyczyną jest długi czas martwy wynikający ze skomplikowanego mechanizmu gaszenia lawiny.
- 2) Specyficzny rozkład parametrów poszczególnych pikseli, szczególnie na peryferiach detektora jest wynikiem występowania pasożytniczych elementów związanych z technologią warstwy kontaktowej p+.
- 3) Wykryto, że współczynnik wypełnienia matrycy jest mniejszy niż 100%.
- 4) Wykonano symulację MC rozwoju lawiny w detektorze MPPC i wywnioskowano, że prawdopodobieństwo zapoczątkowania lawiny przez nośniki wygenerowane w sąsiedztwie złącza jest małe oraz że zależy liniowo od napięcia zasilającego.

Łukasz

W rozprawie w sposób minimalny, przeprowadzono analizę literatury przedmiotu i skoncentrowano się na analizie własnych wyników, z przywołaniem źródeł w miarę potrzeb. Ten sposób postępowania uważam za rozsądny.

Autor rozwiązał zagadnienia związane z budową aparatury pomiarowej w stopniu umożliwiającym analizę detektorów MPPC i MAPD. Nie jest podana informacja w jakim stopniu zrewidowano osiągnięcia zespołu PW, który przeanalizował 1200 detektorów MPPC dla eksperymentu T2K.

W zakresie proponowanego modelu elektrycznego i behawioralnego MPPC nie dostrzegam innowacji w stosunku do literaturowych doniesień. Natomiast symulacja modu Geigera i symulacja warstwy kontaktowej p+ jest oryginalnym osiągnięciem autora.

W zakresie modelu elektrycznego MAPD proponowany model elektryczny jest bardzo prosty, w szczególności podział pojemności piksela na pół wynika z lakonicznych danych literaturowych i własne pomiary nie posłużyły do weryfikacji tego założenia. Próby określenia założeń do modelu fizycznego detektora MAPD są częściowo udane, a niewątpliwie wartościowy jest wynik to analiza czasu martwego i określenie dwóch wzmocnień elektronowych. Analiza C-V detektora MPPC jest bardzo dobra, natomiast detektora MAPD nie, ponieważ w krytycznym zakresie napięć jest ok. 9 punktów pomiarowych. Autorzy koncepcji detektora MAPD i posiadacze patentu w 2016 określili kilka rejonów warstwy dryftowej typu p o różnych grubościach i domieszkowaniu. Ponadto wykryto znaczne różnice wartości zmierzonych pojemności w zależności od częstotliwości pomiarowej, ale autorzy nie wyciągnęli z tych pomiarów wniosków. Prawdopodobnie technologia detektorów MAPD jest niedoskonała i występuje bogate spektrum stanów ładunkowych związanych z defektami strukturalnymi- stąd dyspersja wartości pojemności.

W zakresie fizycznego modelowania MAPD autor skoncentrował się na analizie długiego czasu martwego i wyprowadził analityczną zależność zaniku ładunku w czasie. Natomiast analityczne rozpracowanie czasu rozładowania do 40ns (rysunek 4.15) jest bardzo ważne i nie zostało przedstawione. Według mojej wiedzy taki wynik nie był dotychczas opublikowany.

Hipotezę autora (przedstawioną w opisie rysunku 4.17), dotyczącą krytycznego czasu rozładowania 50ps, w którym znika połowa ładunku piksela uważam za odgadniętą. Prawdopodobnie ten zakres pomiaru był poza zasięgiem eksperymentu. Jedyne merytoryczne błędne założenie to formuła 4.26 która dotyczy ruchu pojedynczego nośnika, podczas gdy prąd w zaciskach przyrządu zależy od ruchu wszystkich nośników w strukturze, ale do jego obliczenia potrzebna jest informacja o pędzie każdego elektronu.

Podkreślam z uznaniem duży nakład pracy doktoranta związany z charakteryzacją (szczególnie mapowaniem parametrów) MAPD. Uważam, że autor przedstawił wartościowe wyniki szczególnie dla społeczności działającej w dziedzinie eksperymentów z cząstkami elementarnymi. Jak sądzę jego wyniki będą cytowane, bo osiągnął je jako pierwszy. Krytycyzm wynikający z niedostatków modelu fizycznego MAPD nie jest twórczy, ponieważ informacja na temat nowej technologii celowo nie jest upowszechniona. Nie zachęcam do dalszych wysiłków w tym zakresie, ponieważ nakład pracy na *reverse engineering* byłby ewentualnie uzasadniony w laboratoriach konkurencji, a nie na terenie PW. Rozprawa jest napisana po angielsku. Tekst jest jednoznaczny - przedstawiona treść nie pozostawia wątpliwości. Zapewne mógłby zostać udoskonalony przez lingwistę.

Uważam, że rozprawa mgr Andrzeja Rychtera spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy.

Jakowicz