

Warszawa, sierpień-wrzesień 2014 r.

Prof. dr hab. Wojciech DOMINIK
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
Pasteura 5, 02-093 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Alicji Zielińskiej pt.
**Rozwój pozycjoczułego systemu detekcyjnego na bazie detektora typu
GEM do zastosowań w dwuwymiarowym obrazowaniu metodami
radiografii i fluorescencji rentgenowskiej**

Rozprawa doktorska mgr inż. Alicji Zielińskiej dotyczy metody pomiarowej rozkładu powierzchniowego promieniowania X za pomocą detektora gazowego wyposażonego w układ odczytu rejestrujący pozycję trafienia fotonu w powierzchnię detektora z oceną zdeponowanej energii. Tematyka pracy jest ważna poznawczo, a także w perspektywie zastosowań użytkowych badanej metody pomiarowej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Zielińskiej stanowi podsumowanie pracy związanej z opracowaniem i weryfikacją nowego systemu pomiaru promieniowania z odczytem, przetwarzaniem i rejestracją sygnałów za pomocą specjalnie skonstruowanego układu elektronicznego opartego na specjalizowanym układzie scalonym GEMROC. Architektura układu scalonego GEMROC wzorowana jest na wcześniejszym układzie specjalizowanym MSGCROC, opracowanym w ramach projektu DETNI przez zespół badawczy Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH kierowany przez prof. Władysława Dąbrowskiego. System odczytowy dedykowany do gazowego detektora GEM wraz z układem GEMROC jest autorskim dziełem zespołu krakowskiego. Autorka rozprawy uczestniczyła w pracach zespołu współwykonując projekt oraz wykonując symulacje obwodów stopnia wejściowego GEMROC wraz z analizą obwodu zabezpieczającego wejścia. Autorka wykonała pełne pomiary charakterystyk serii 54 układów GEMROC dobierając grupę ośmiu układów umożliwiających uzyskanie najlepszej jednorodności działania wielokanałowego systemu odczytu. Autorka przeprowadziła samodzielnie zasadnicze pomiary weryfikacyjne systemu detekcyjnego w obrazowaniu metodą fluorescencji rentgenowskiej XRF oraz radiografii XRR, a także wykonała analizę materiału doświadczalnego. Udział Autorki w przedsięwzięciu badawczym jest w pracy wyraźnie zaznaczony i stanowi indywidualny, bardzo istotny wkład w proces opracowania nowatorskiej metody i techniki pomiarowej w odniesieniu do obrazowania rentgenowskiego dzieł sztuki malarskiej. Autorka koncentruje się w rozprawie na przedstawieniu wyników prac własnych.

Tytuł rozprawy zapowiada szerokie ujęcie zastosowań nowatorskiej aparatury dwuwymiarowego obrazowania w widmie rentgenowskim za pomocą detektora typu GEM. We wstępie Autorka zapowiada zawężenie zadania badawczego do weryfikacji możliwości obrazowania metodami radiografii i fluorescencji rentgenowskiej rozkładu pigmentów w dziełach malarskich. Takie zawężenie nie umniejsza wartości poznawczej i wartości technicznej wyniku. Skoncentrowanie uwagi na konkretnym problemie diagnostycznym pozwala na efektowną prezentację skuteczności proponowanej przez Autorkę metody pomiarowej oraz intuicyjną ocenę jakościową. Uzyskane wyniki mogą być łatwo odniesione do diagnostyki rentgenowskiej innych obiektów, gdzie celem pomiaru jest określenie rozkładu koncentracji pierwiastków w płaskim obiekcie warstwowym. Wspomniane zawężenie pola

badawczego nie powoduje niezgodności z tytułem rozprawy. Rozwój własnego systemu pomiarowego pokazany jest w kontekście zastosowania na wybranym i dobrze określonym polu diagnostycznym.

Obrazowanie za pomocą pomiaru transmisji rentgenowskiej (XRR) i pomiaru emisji wzbudzeniowej w zakresie energii promieniowania rentgenowskiego (XRF) są metodami komplementarnymi. O ile stosowanie radiograficznego obrazowania struktury obiektów w projekcji na płaszczyznę ekranu ma bardzo długą tradycję i naturalna geometria układu diagnostycznego jest powszechnie znana, to obrazowanie metodą fluorescencji rentgenowskiej jest stosunkowo nową techniką. Do skutecznego obrazowania fluorescencyjnego niezbędna jest nie tylko precyzja pomiaru pozycji, ale przede wszystkim dobra rozdzielczość energetyczna detektora przy możliwie pełnej wydajności. Gazowy detektor typu GEM o segmentowanej elektrodzie odczytu wraz z elektroniką zapewniającą analizę pojedynczych sygnałów jest właściwym wyborem dla tworzenia aparatu rejestracji obrazu z możliwością klasyfikacji energii.

Fizyka promieni X inspirowała i wspomagała różnorodne prace badawcze i rozwojowe w naukach przyrodniczych, ale także wywarła wpływ na technologie medyczne. Obecnie technologie wykorzystujące promieniowanie X nadal odgrywają istotną rolę w rozwoju badań materiałowych, nieniszczącej kontroli procesów produkcyjnych oraz w diagnostyce medycznej i planowaniu terapii.

Od czasu doświadczalnego ustalenia przez Henry Moseley'a w 1913 związku liczby atomowej pierwiastków i energii emitowanego promieniowania charakterystycznego K_{α} , możliwa stała się identyfikacja atomowego składu materiałów. Skuteczne wykorzystanie procesów fizycznych w diagnostyce wymagało sterowanego źródła promieniowania X oraz precyzyjnych detektorów promieniowania o dużej wydajności detekcji i rozdzielczości energetycznej.

Postęp w zastosowaniu metod badawczych z wykorzystaniem promieniowania X wiąże się z rozwojem technologii źródeł promieniowania oraz rozwojem instrumentarium detektorów, w szczególności detektorów z odczytem elektronicznym. Stosowane tradycyjnie w obrazowaniu radiograficznym detektory pasywne, takie jak klisze rentgenowskie lub ekrany luminescencyjne, umożliwiają uzyskanie doskonałej rozdzielczości obrazu. Nie jest jednak możliwa analiza obrazu w funkcji zakresu widmowego promieniowania X; pewną uciążliwością jest też nieliniowość odpowiedzi w funkcji natężenia strumienia fotonów, ograniczona dynamika oraz długi czas ekspozycji wymagany przy niewielkich strumieniach. Tworzenie elektronicznej aparatury umożliwiającej osiągnięcie rozdzielczości obrazu porównywalnej z kliszą rentgenowską wraz z oceną energii fotonów stało się jednym z ważniejszych kierunków rozwojowych towarzyszących fizyce i technice elektronicznych detektorów promieniowania jonizującego. Intensywny rozwój techniki detektorów krzemowych i detektorów gazowych oraz mikroelektroniki odczytu i bieżącego przetwarzania informacji ściśle wiąże się ze światowymi programami doświadczalnymi w dziedzinie fizyki cząstek. Twórcy właściwie wszystkich detektorów pozycjoczułych podejmowali próby zastosowania w obrazowaniu radiograficznym.

Od narodzin techniki związanej z wynalezieniem wielodrutowej komory proporcjonalnej przez Georges Charpaka wiele zespołów podejmowało, często skuteczne próby zastosowania detektorów gazowych w rentgenografii. Znaną wadę detektorów gazowych, jaką jest mały przekrój czynny na proces fotoelektryczny w materii rozrzedzonej, kompensowała możliwość budowania urządzenia detekcyjnego o dużej powierzchni aktywnej.

Wynalezienie przez Fabio Sauli'ego struktury elektrody umożliwiającej lawinowe powielanie ładunku w gazie typu Gas Electron Multiplier (GEM) otworzyło możliwości budowy detektorów obrazowania z większą elastycznością pomiaru pozycji dzięki pełnemu rozdzielaniu przestrzennemu wzmocniacza gazowego i elektrody odczytu.

Recenzowana rozprawa liczy 110 stron wraz z rysunkami, spisem rysunków, spisem tabel oraz spisem literatury obejmującym 74 pozycje. Praca napisana w języku polskim. Struktura pracy bardzo przejrzysta, prawidłowa i zgodna ze standardami pracy naukowej. Uwagę zwraca bardzo ładna strona graficzna i duża staranność edytorska.

Rozprawa zredagowana w sposób zwarty. Autorka konsekwentnie prowadzi główną myśl bez zbędnego rozwijania zagadnień pobocznych. Ograniczone do niezbędnego minimum przedstawienie problematyki obrazowania radiograficznego i fluorescencyjnego z wykorzystaniem miękkiego promieniowania rentgenowskiego, zawarte w rozdziale 2, stanowi dobre wprowadzenie w zasadniczą problematykę pracy. Omówione zostały podstawy praktycznej fizyki leżącej u podstaw technik radiografii i fluorescencji rentgenowskiej. W omówieniu detektorów stosowanych przez innych, bardziej szczegółowo przedstawione są rozwiązania oparte na użyciu krzemowych detektorów dryfowych SDD oraz matrycy diod krzemowych (MAIA), które zastosowano w wybranych doświadczeniach obrazowania pigmentów malarskich. Pojedyncze detektory charakteryzują się stosunkowo niewielkimi powierzchniami mogą być stosowane głównie w pomiarach skaningowych. Autorka zwraca uwagę na długi czas pojedynczej diagnozy fluorescencyjnej związany z zastosowaniem metody przemiatania powierzchni obiektu przez skolimowaną wiązkę fotonów X. Kilkudziesięciogodzinny pomiar XRF pojedynczego obiektu prowadzony w stabilnych warunkach stanowi niewątpliwie ograniczenie, chociaż zastosowanie detektora krzemowego umożliwi uzyskanie bardzo dobrej rozdzielczości energetycznej. Pożądane skrócenie czasu pomiaru przez zastosowanie detektora obrazowania 2-D pozwala oczekiwać krótszych czasów pomiarów i zadowalającego rozpoznawania pigmentów malarskich nawet przy gorszej rozdzielczości energetycznej czujnika. Przyjmuję, że takie rozumowanie było przesłanką prac nad użyciem pozycjoczułego w dwóch wymiarach detektora gazowego typu GEM z dedykowaną elektroniką przetwarzania sygnałów.

W prezentacji aparatury stosowanej radiografii mgr inż. Zielińska wymienia używane powszechnie w diagnostyce medycznej płyty luminoforowe. Nie wspomina jednak o możliwościach zastosowania elektronicznych paneli krzemu amorficznego, które wypierają płyty luminoforowe w transmisyjnej diagnostyce rentgenowskiej. Sądzę, że technika *flat panel amorphous silicon* zasługuje na krótką ocenę przydatności w badaniach obiektów malarskich. W tej części nie jest dla mnie zrozumiałe pojęcie „detektor z dyspersją energii” użyte w tekście na stronie 12.

W kolejnym rozdziale mgr Zielińska przedstawia koncepcję obrazowania za pomocą detektora typu GEM. Skrótowo dyskutuje geometrię pomiaru radiograficznego, co uzasadnia dość oczywiste względne pozycjonowanie źródła, obiektu i detektora. Do pomiarów fluorescencyjnych wybrana została geometria typu *camera obscura*. Analiza zależności rozdzielczości pomiaru pozycji od średnicy otwarcia kamery otworkowej oraz kąta padania fotonów na powierzchnię detektora przeprowadzona jest bardzo poprawnie i kompletnie. Zauważonym błędem jest niezgodność formuły 3.5 charakteryzującej wypadkową rozdzielczość pozycyjną (za pracą cytowaną jako [31]) z wcześniej wprowadzonymi wyrażeniami 3.3 i 3.4 na składową rozdzielczości wewnętrznej detektora oraz tzw. błąd paralaksy związany z kątem trafienia fotonu w powierzchnię detektora.

Detektor gazowy GEM o wymiarach aktywnej powierzchni okna 10cm x 10cm wykorzystany do badań wykonany został w CERN. Wewnętrzne ułożenie elektrod

wzmacniających oraz elektrody skrzyżowanych pasków odczytu sygnału jest identyczne ze strukturą detektorów zbudowanych do eksperymentu COMPASS w CERN. Zastosowanie kaskadowego układu wzmacnienia lawinowego utworzonego przez trzy folie GEM jest dobrym wyborem w detektorze służącym do pomiaru pojedynczych sygnałów generowanych przez fotony o energiach w zakresie do kilkunastu keV. Takie rozwiązanie pozwala uzyskać duże wzmacnienie sygnałów pierwotnych przy bezpiecznych napięciach pracy i zminimalizowaniu częstości spontanicznych wyładowań powodowanych przez silnie jonizujące promieniowanie tła. Mgr inż. Alicja Zielińska przedstawia obszernie i kompletnie procesy fizyczne zachodzące w detektorach gazowych determinujące ich charakterystyki użytkowe. Omawia też strukturę i charakterystyki detektora używanego we własnych eksperymentach syntetyzując wyniki pomiarów charakterystyk napięciowych detektorów GEM opracowanych do aparatury COMPASS. Niestety nie ustrzegła się błędu widocznego na rysunku 4.2, który opracowany został na podstawie dwóch wykresów zawartych w pracy wymienianej pod numerem [47]. Krzywe charakteryzujące detektory z pojedynczym i podwójnym stopniem wzmacnienia zostały odwrotnie podpisane; także zielone krzywe zostały nieprawidłowo ulokowane na mapie napięcie-wzmacnienie(wyładowania). Zauważone błędy nie podważają poprawności głównej konkluzji wskazującej na trzystopniową strukturę, jako najodpowiedniejszą do zbudowania zamierzonego urządzenia diagnostycznego.

Zasadniczą część rozprawy mgr inż. Alicji Zielińskiej stanowią rozdziały 5 - 8 poświęcone odpowiednio zagadnieniom systemu elektronicznego do odczytu detektora GEM, parametryzacji układów GEMROC, parametryzacji systemu detekcyjnego oraz przedstawieniu i omówieniu wyników pomiarów obrazowania wzorcowych próbek (fantomów malarskich) metodami fluorescencji i radiografii rentgenowskiej.

Cechy i funkcjonalność wielokanałowego układu odczytu informacji pierwotnej z detektora gazowego determinują zakres zastosowań całego urządzenia pomiarowego oraz możliwą precyzję pomiaru pozycji trafienia czy energii fotonu X. Architektura układu GEMROC jest w pełni odpowiednia do pomiaru skoncentrowanych w przestrzeni detektora chmur ładunku elektrycznego. Układ zapewnia pomiar ładunku i czasu wystąpienia sygnału oraz identyfikację kanału, w którym pojawił się sygnał. Autorka przeprowadziła szczegółową analizę kształtu i parametrów układu protekcyjnego łączącego paski odczytowe detektora z wejściami wzmacniacza. Dobór właściwej wartości pojemności i szeregowej rezystancji w sprzężeniu AC są kluczowe dla minimalizacji przesłuchów między kanałami. Dokonany finalny wybór wartości pojemności 470 pF oraz zerowej rezystancji szeregowej jest w pełni uzasadniony wynikami modelowania. W tekst pod rysunkiem 5.16 wkradł się błąd: pojemność sprzężenia AC powinna być możliwie największa, zamiast „możliwie najniższa”. Poza tym błędem rozważania dotyczące kształtu układu zabezpieczającego są w pełni przekonywujące.

Przepustowość wybranego systemu przetwarzania i przesyłu danych w układzie pomiarowym ma fundamentalne znaczenie dla zakresu zastosowań. Mgr inż. Alicja Zielińska pokazuje, że główne ograniczenie wynika z szybkości zastosowanego standardu Ethernet i wynosi 1 Gb/s. Uzasadniona jest teza stawiana przez Autorkę, iż dla planowanych zastosowań XRF i XRR w diagnostyce dzieł malarstwa strumień danych dla częstości zliczeń 10^6 zdarzeń/s odpowiada $\frac{1}{4}$ maksymalnej przepustowości systemu. Możliwość buforowania danych w pamięci FIFO FPGA pozwala utrzymać drożność transmisji w razie wystąpienia fluktuacji strumienia danych.

Do pojedynczych wejść układu GEPROC podłączone zostały pary sąsiadujących pasków elektrody odczytu detektora. W ten sposób zminimalizowano liczbę kanałów elektroniki obsługujących powierzchnię detekcyjną oraz czterokrotnie zredukowano wielkość strumienia informacji przesyłanych do przetwarzania w następnych stopniach. Rozdzielczość

przestrzenna w pomiarach XFR, wynikająca głównie z wielkości „soczewki” kamery otworkowej, uległa nieznacznemu tylko pogorszeniu, co Autorka wyprowadziła szczegółowo w Rozdziale 3.

Mgr inż. Zielińska dokonała selekcji układów GEMROC wybierając 8 układów o największej jednorodności wzmocnienia ładunkowego i napięcia niezrównoważenia toru czasowego oraz jednorodności wzmocnienia i piedestału w torze analogowym poszczególnych kanałów. Zmierzone wzmocnienie ładunkowe w torach analogowych oraz czasowych odpowiada założeniom projektowym układu, a rozrzut napięć niezrównoważenia oraz rozrzut piedestałów mieszczą się w zakresie dostrojenia za pomocą wbudowanych układów korekcyjnych. Precyzyjne strojenie układem 5-bitowego przetwornika C/A działa jednocześnie na poziom napięcia niezrównoważenia i piedestał. W wyniku precyzyjnej korekcji wszystkich kanałów wybranych układów Autorka zmniejszyła rozrzut progu dyskryminacji toru czasowego do 1 mV i rozrzut odpowiedzi toru analogowego do kilkudziesięciu mV (ocena na podstawie rysunku 6.13 – nie znalazłem wartości liczbowej w tekście). Autorka w pełni profesjonalnie i z dużą starannością przygotowała w najlepszy sposób układ elektroniki przetwarzania i rejestracji sygnałów z detektora.

Pomiary kalibracyjne pełnego układu detekcyjnego ze standardowo stosowanym do tych celów źródłem ^{55}Fe pozwoliły ocenić cechy aparatury. Rozrzut efektywnego wzmocnienia gazowego na powierzchni detektora sięgający 40% jest spodziewany i wynikający ze sposobu montażu w CERN i wewnętrznej dystrybucji gazu. Utworzona mapa wielkości sygnałów pozwoliła określić macierz współczynników korekcji stosowanych w analizie *off-line*. Skuteczność opracowanej przez mgr inż. Zielińską metody potwierdza bardzo dobra energetyczna zdolność rozdzielcza dla całej powierzchni detektora oświetlanej fotonami X ze źródła ^{55}Fe . Wynik na rysunku 7.8 pokazujący rozdzielczość energetyczną, wynoszącą 20% po korekcji, potwierdza bardzo dobre parametry aparatury oraz właściwą kalibrację.

W zawartych w tekście rozprawy badanych charakterystykach cząstkowych niepokój budzi wykres 7.6b przedstawiający zależność nieskorygowanej rozdzielczości energetycznej od napięcia pracy detektora. W zakresie napięć zasilania do 4.0 kV rozdzielczość jest stała na poziomie 29.5%. Dla napięć wyższych rozdzielczość gwałtownie poprawia się do poziomu 23%. Autorka nie komentuje tego faktu, a szkoda, gdyż zdecydowanie wymaga on wyjaśnienia.

Pięknym zwieńczeniem opisanych etapów rozwoju pozycjoczułego systemu pomiarowego z detektorem gazowym typu GEM są wyniki obrazowania metodami XFR i XRR specjalnie przygotowanych fantomów malarskich. Dzięki wysokiej czułości aparatury i dobrej energetycznej zdolności rozdzielczej, można uzyskać obrazy rozkładów powierzchniowych żelaza, miedzi i ołowiu wchodzących w skład poszczególnych pigmentów. Także obrazy utworzone z pigmentów zawierających miedź i ołów ukryte pod nieprzezroczystą warstwą barwnika zawierającego żelazo stają się łatwo rozpoznawalne po zastosowaniu odpowiednich cięć w widmie energetycznym.

W bardzo krótkim podsumowaniu mgr inż. Zielińska wskazuje kilka możliwych wariantów poprawy parametrów systemu, koncentrując się na detektorze gazowym. Zastosowanie mieszanki gazowej opartej na ksenonie zamiast na argonie na pewno zwiększa kilkakrotnie absorpcję miękkich fotonów X w warstwie dryfowej detektora, co powinno skutkować skróceniem czasu pojedynczej ekspozycji diagnostycznej. Oceniać można, że propozycja jest wyłącznie ćwiczeniem naukowym – przy danej technologii konstrukcji detektora GEM, koszt zużywanego ksenonu stanowiłby barierę dla zastosowań rutynowych. Użycie ksenonu może być właściwe w gazowym detektorze skonstruowanym w technologii próżniowej, co otwierałoby pole dalszych badań technologicznych. Propozycja zminimalizowania masy miedzi w stopniu wejściowym detektora jest właściwa; w foliach

GEM pewnie nie będzie to możliwe szybko, ale zastąpienie miedziowanych folii tworzących okno wejściowe, foliami z warstwą aluminium jest stosunkowo łatwe technicznie i powinno znacząco zmniejszyć efekty wewnętrznej fluorescencji detektora. Nie jest dla mnie w pełni zrozumiałe, co w praktyce oznacza zastosowanie tzw. gazowej mieszaniny penningowskiej i jaka jest oczekiwana ilościowa poprawa rozdzielczości energetycznej. Stwierdzenie o możliwości zwiększenia intensywności rejestrowanego promieniowania w pomiarach XFR poprzez „wykorzystanie kamery otworkowej składającej się z kilku otworów” budzi wątpliwości. Wydaje się, że w wyniku zastosowania takiego rozwiązania pogorszy się rozdzielczość obrazu. Wskazane kwestie wymagają wyjaśnienia.

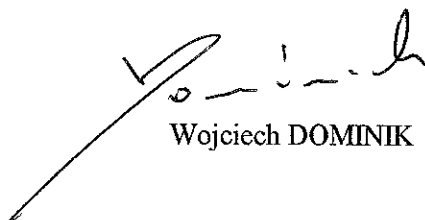
Mgr inż. Alicja Zielińska z sukcesem wykonała badania pokazujące skuteczność stosowanej metody i jej technicznej realizacji w diagnostyce XFR i XRR dzieł malarskich. Otworzyła w ten sposób nowy kierunek zastosowań zarówno detektorów gazowych typu GEM, jak i opracowanego w AGH elektronicznego systemu odczytu z wykorzystaniem specjalizowanego układu scalonego GEMROC. Koncepcja obrazowania pigmentów malarskich została potwierdzona za pomocą układu prototypowego. Warto podkreślić, iż badania weryfikacyjne prowadzone były w ścisłej współpracy z Laboratorium Analiz i Nieniszczących Badań Obiektów Zabytkowych Muzeum Narodowego w Krakowie. Zainteresowanie środowiska użytkowników potwierdza zasadność podjęcia zadania stworzenia dedykowanego systemu pomiarowego. Liczyć należy, że pilnie znajdują się odpowiednie środki na dokończenie badań i przystąpienie do etapu prac rozwojowych, który może zostać uwieńczony wdrożeniem.

Kilka słów krytycznych o stronie językowej rozprawy. Rozprawa napisana jest poprawnym językiem polskim. Nadmiernie jednak używane są oceny jakościowe zamiast podania wartości, nawet przybliżonej, lub przedziału wartości. Na przykład: „znaczącymi ograniczeniami” (str. 3), „dokładnie określić pozycję” (str.37), „intensywność promieniowania była bardzo duża” (str. 39), „jakieś krzywe” (str.72). Nieprawidłowe jest też użycie określenia „amplituda” w odniesieniu do ładunku tzw. klastra zarejestrowanego na kilku sąsiednich paskach odczytu (np. str.75).

Powyższe uwagi nie umniejszają dużej wartości merytorycznej rozprawy.

Przedstawiona praca świadczy o dojrzałości Autorki, a także o jej obszernej wiedzy w przedmiocie rozprawy.

Praca doktorska mgr inż. Alicji Zielińskiej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i technicznego; spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Rozprawę oceniam wysoko i wnioskuję o dopuszczenie Autorki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Wojciech DOMINIK