

# Paweł GRYBOŚ<sup>1</sup>, Piotr MAJ<sup>1</sup>, Robert SZCZYGIEŁ<sup>1</sup>, Krzysztof ŚWIENIEK<sup>2</sup>, Luciano RAMELLO<sup>3</sup>, Ana Ester CABAL RODRIGUEZ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>KATEDRA METROLOGII, AGH, AL. MICKIEWICZA 30, 30-059 KRAKÓW

<sup>2</sup>KATEDRA ODDZIAŁYWAŃ I DETEKCJI CZĄSTEK, AGH, AL. MICKIEWICZA 30, 30-059 KRAKÓW

<sup>3</sup>DSTA, UNIVERSITA DEL PIEMONTE ORIENTALE AND INFN, ALESSANDRIA, ITALY

<sup>4</sup>CEADEN, HAVANA, CUBA

## Testy systemu do obrazowania cyfrowego umożliwiającego pracę z promieniowaniem X o dużym natężeniu i selekcję energetyczną fotonów

Dr hab inż. Paweł GRYBOŚ

Uzyskał stopień magistra inżyniera, doktora nauk fizycznych i doktora habilitowanego w dyscyplinie elektronika na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, odpowiednio w latach 1991, 1995 i 2004. Jest autorem lub współautorem ponad 90 prac naukowych głównie z zakresu specjalizowanych układów scalonych.

e-mail: pawelgrybos@agh.edu.pl

Mgr inż. Piotr MAJ

Absolwent Wydziału Elektroniki, Automatyki, Informatyki i Elektrotechniki Akademii Górniczo – Hutniczej. Studia na kierunku Inżynieria Komputerowa w Przemysle ukończył w roku 2005 i od tego czasu jest doktorantem WEALiE AGH.

e-mail: piotr.maj@agh.edu.pl

Dr inż. Robert SZCZYGIEŁ

Uzyskał stopień magistra inżyniera, doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektronika na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, odpowiednio w latach 1995 i 2006. Jest autorem lub współautorem ponad 30 prac naukowych, głównie z zakresu specjalizowanych układów scalonych.

e-mail: robert.szczyniel@agh.edu.pl

### Streszczenie

W pracy przedstawiono budowę i wyniki testów zintegrowanego modułu do obrazowania cyfrowego umożliwiającego pracę z promieniowaniem X o dużym natężeniu i selekcję fotonów w zależności od ich energii. Elementem detekcyjnym modułu jest paskowy detektor krzemowy, z którego informacja jest odbierana i przetwarzana przez wielokanałowe specjalizowane układy scalone o architekturze binarnej. Uzyskane wyniki pomiarów 128 kanałowego modułu potwierdzają bardzo dobrą jednorodność poszczególnych kanałów, niski poziom szumów elektroniki odczytu oraz jej poprawną pracę również w przypadku bardzo dużej częstości impulsów wejściowych.

**Słowa kluczowe:** układy ASIC, detektory krzemowe, techniki obrazowania cyfrowego

### Tests of system for digital imaging with the X-ray of high intensity and selection of photon energy

#### Abstract

The paper presents construction and tests of integrated module for digital X-ray imaging. This module could work with high X-ray intensity and selects photons according their energy. The module consists of silicon strip detector and ASICs of binary architecture. The measurement results of 128-channel module show its good noise parameters, uniformity of analogue parameters of multichannel ASIC and its possibility to work with high rate of input pulses.

**Keywords:** ASIC, silicon strip detectors, digital imaging

## 1. Wprowadzenie

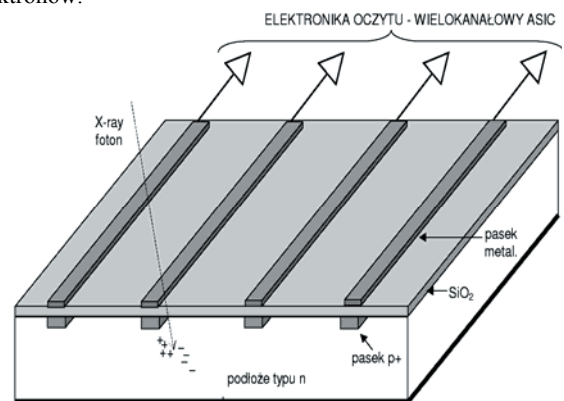
W ostatnich latach matryce detektorów półprzewodnikowych (Si, CZT, itp.) pracujące w trybie pojedynczego zliczania fotonów są coraz częściej stosowane w różnych technikach obrazowania z wykorzystaniem promieniowania X [1-3]. Głównymi zaletami tych detektorów są: szybki czas odpowiedzi (na poziomie dziesiątek ns) i bardzo dobra przestrzenna zdolność rozdzielcza (na poziomie dziesiątek  $\mu\text{m}$ ). Autorzy pracy zbudowali moduł do obrazowania cyfrowego w oparciu o paskowe detektory krzemowe i zaprojektowane wielokanałowe specjalizowane układy scalone o architekturze binarnej mogące efektywnie pracować z dużą częstością impulsów wejściowych.

Segmentacja detektora i scalone wielokanałowe układy elektroniki odczytu zapewniają odpowiednią pozycyjną zdolność rozdzielczą systemu, podczas gdy możliwość selekcji w torze elektroniki odczytu sygnałów o różnej amplitudzie i zliczanie ich niezależnie umożliwia odzyskiwanie informacji o energii fotonów tworzących obraz. Moduł zbudowano z myślą o dwóch aplikacjach. Pierwszą z nich są badania materiałowe próbek o niewielkiej objętości, gdzie zastosowanie matrycy mikro-detektorów ze scaloną wielokanałową elektroniką odczytu skróci 100-krotnie czas pomiaru [4]. Drugą rozważaną aplikacją jest obrazowanie w medycynie z wykorzystaniem promieniowania X o dwóch różnych energiach (mammografia, angiografia) [5].

Kolejne rozdziały w pracy omawiają ideę działania krzemowego detektora paskowego, architekturę wielokanałowego układu scalonego, zbudowany 128-kanałowy moduł do detekcji promieniowania X oraz uzyskane wyniki pomiarowe.

## 2. Krzemowy detektor paskowy

Elementem konwertującym promieniowanie X na sygnały elektryczne jest paskowy detektor krzemowy, przedstawiony poglądowo na rys. 1. Jest on matrycą diod wykonanych w formie pasków na monolitycznej płytce wysokoatomowego krzemu i spolaryzowanych w kierunku zaporowym. Kwanty promieniowania X wpadając w obszar czynny detektora generują określoną liczbę par elektron-dziura ze współczynnikiem konwersji 3.65 eV/parę. Przykładowo fotony promieniowania X o energii 8 keV (stosowane w badaniach materiałowych) generują w detektorze krzemowym ładunek około 2200 elektronów, podczas gdy fotony o energii 40 keV (wykorzystywane np. w diagnostyce medycznej) generują ładunek około 11000 elektronów.



Rys. 1. Poglądowy rysunek paskowego detektora krzemowego  
Fig. 1. Scheme of silicon strip detector

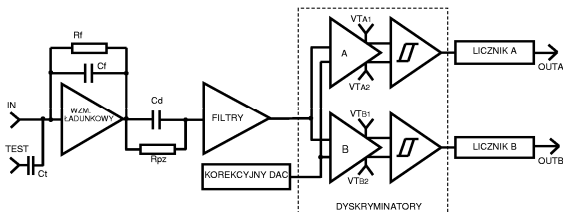
Wygenerowany ładunek jest zbierany na paskach detektora dając krótkie (trwające około 20 ns) impulsy prądowe, noszące ładunek proporcjonalny do energii zaabsorbowanego kwantu. Każdy z pasków posiada swój niezależny tor elektroniki odczytu, będący częścią wielokanałowego specjalizowanego układu scalonego ASIC (*ang.* Application Specific Integrated Circuit).

### 3. Architektura układu scalonego

Specjalizowany układ scalony ASIC o nazwie DEDIX (*ang.* Dual Energy Digital Imaging of X-rays) jest 64 kanałowym układem scalonym o architekturze binarnej dostosowanym do pracy z matrycą detektorów półprzewodnikowych, pracujących w trybie pojedynczego zliczania fotonów. Układ scalony został zaprojektowany i wykonany w technologii 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS [6].

Schemat pojedynczego kanału odczytowego przedstawia rys. 2. Na tor odczytowy składa się wzmacniacz ładunkowy wraz z układem kompensacji biegun-zero, układ kształtujący CR-RC<sup>2</sup>, dwa niezależnie pracujące dyskryminatory (zwane odpowiednio dyskryminatorami A i B) oraz dwa 20-bitowe liczniki wraz z układami pamięci RAM. Napięcie progowe dla dyskryminatorów A we wszystkich 64 kanałach ustawiane jest przez wspólny 8-bitowy przetwornik C/A. Podobnie wygląda sytuacja dla wszystkich dyskryminatorów B, gdzie próg dyskryminacji ustawiany jest przez drugi niezależny przetwornik C/A. Zastosowanie dwóch niezależnych dyskryminatorów w torze odczytu pozwala na selekcję impulsów o określonej amplitudzie (amplituda jest wprost proporcjonalna do energii zaabsorbowanych fotonów promieniowania X).

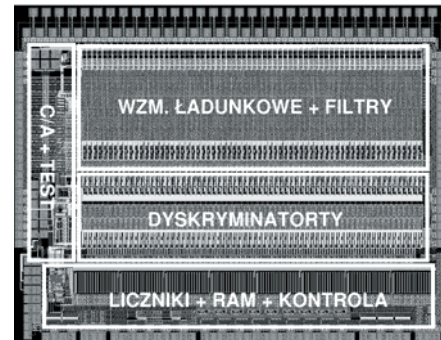
Aby zminimalizować efekty rozrzutu napięć stałych w systemie wielokanałowym, w którym wykorzystuje się wspólny próg dyskryminacji dla wszystkich 64 kanałów, w każdym kanale zastosowano niezależny korekcyjny przetwornik cyfrowo-analogowy o rozdzielczości 7 bitów. Obsługa kanałów elektroniki odczytu, przetworników C/A oraz obsługa zbieranych danych odbywa się za pośrednictwem zaimplementowanego na układzie scalonym wewnętrznego dekodera komend sterowanego za pośrednictwem standardowej cyfrowej karty I/O z komputera PC.



Rys. 2. Architektura pojedynczego kanału  
Fig. 2. Block diagram of the single channel

### 4. Plan masek układu scalonego

Plan masek układu scalonego o wymiarach 3900×5000  $\mu\text{m}^2$  wykonanego w technologii 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS austriamicrosystems przedstawia rys. 3. Ze względu na mieszany analogowo-cyfrowy charakter układu scalonego szczególną uwagę zwrócono na minimalizację szkodliwych efektów przesłuchu. Linie zasilania analogowego i cyfrowego zostały rozdzielone i posiadają osobne pola kontaktowe. Przykładowo linia zasilania analogowego obsługująca wszystkie 64 kanały o długości 5000  $\mu\text{m}$  ma szerokość 400  $\mu\text{m}$  i jest złożeniem trzech kolejnych warstw metalu 2, metalu 3 i metalu 4 oraz jest podłączona ze światłem zewnętrznym przez 6 pól kontaktowych rozmieszczonych symetrycznie po obu stronach układu scalonego. Ponadto bloki analogowe i cyfrowe posiadają oddzielne pierścienie ochronne z warstw dyfuzyjnych typu  $n^+$  i  $p^+$ .

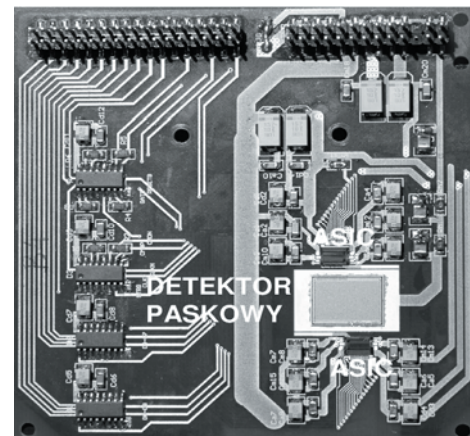


Rys. 3. Plan masek układu scalonego DEDIX  
Fig. 3. Layout of the DEDIX IC

Wejściowe pola kontaktowe łączące układ z poszczególnymi mikrosensorami (w naszym przypadku paski detektora krzemowego), rozmieszczone są co 75  $\mu\text{m}$  i ekranowane od spodu studnią typu  $p^+$  podłączona do dodatniego napięcia zasilania. Zarówno na poziomie doboru architektury bloków analogowych, jak i etapie rysowania planu masek układu scalonego zwrócono szczególną uwagę na minimalizację efektów rozrzutu parametrów technologicznych (stosowanie struktur różnicowych, a na poziomie planu masek zasady rysowania elementów w geometrii wspólnego środka).

### 5. Testowany moduł i uzyskane wyniki pomiarów

Do testów układu scalonego wykonano dedykowaną płytkę PCB o wymiarach 95 x 99  $\text{mm}^2$ , pokazaną na rys. 4. Na płytce PCB montowano paskowy detektor krzemowy (o odległości pomiędzy paskami 75  $\mu\text{m}$  lub 100  $\mu\text{m}$ ) oraz po dwa układy scalone DEDIX. Płytkę wraz z układami ASIC i detektorem stanowi układ 128 pracujących równolegle sensorów, z których każdy posiada niezależny tor elektroniki odczytu. Wszystkie sygnały kontrolne oraz dane przekazywane są do i z modułu w standardzie LVDS.

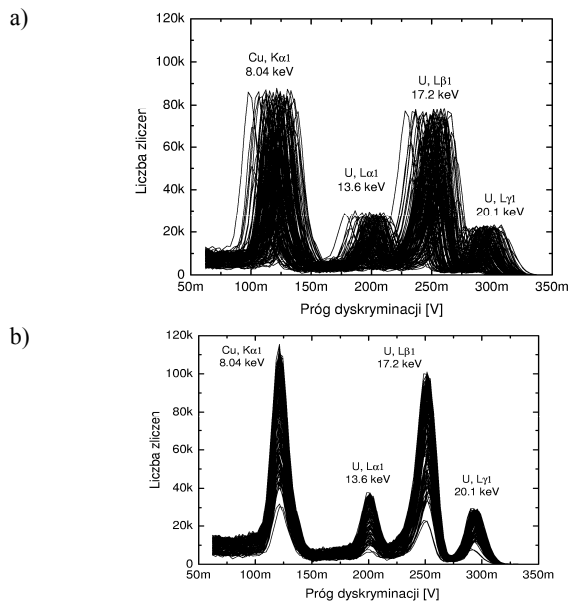


Rys. 4. Zdjęcie testowanego modułu  
Fig. 4. Photograph of the tested module

Na tak przygotowanym module przeprowadzono testy poprawności działania poszczególnych bloków układu scalonego oraz dokonano pomiarów parametrów analogowych torów elektroniki odczytu. Do najistotniejszych parametrów mówiących o jakości zbudowanego modułu należą:

- jednorodność wzmocnienia i poziomów stałych na wejściach dyskryminatorów we wszystkich kanałach układów scalonych,
- poziom szumów własnych,
- zachowanie się układu podczas pracy z dużym natężeniem promieniowania X. Dla oceny rozrzutu parametrów analogowych

poszczególnych kanałów posłużono się źródłem promieniowania X o czterech dobrze określonych liniach energetycznych 8.04 keV, 13.6 keV, 17.2 keV i 20.1 keV, które umieszczono bezpośrednio nad detektorem paskowym. Skanując próg dyskryminacji i różniczkując całkowitą liczbę zliczeń uzyskano widma różniczkowe zmierzone równocześnie w 128 kanałach (rys. 5). Rysunek 5a przedstawia widmo energetyczne przy wyłączonych przetwornikach korekcyjnych, podczas gdy rysunek 5b pokazuje widmo zarejestrowane przy zastosowaniu przetworników korygujących rozrzut poziomów stałych w poszczególnych kanałach.



Rys. 5. Widmo radioaktywnego źródła Pu-238 ze wzbudzoną fluorescencyjnie linią Cu K $\alpha$  zmierzone przy użyciu detektora paskowego i dwóch układów DEDIX (128 kanały): a) przed korekcją, b) po korekcji.  
Fig. 5. Spectra of Pu-238 radioactive source and Cu K $\alpha$  line measured with silicon strip detectors and two DEDIX chip (128 channels): a) before correction, b) after correction.

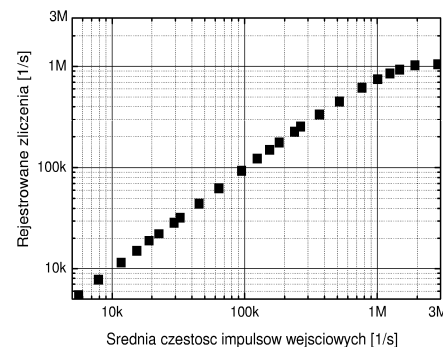
Ustawienia przetworników korekcyjnych zoptymalizowano na linię energetyczną Cu K $\alpha$  (8 keV), a otrzymany rozrzut położenia środków tych pików (odchylenie standardowe) jest poniżej 0.5 mV. Umożliwia to ustawienie wspólnych progów dyskryminacji dla wszystkich 128 kanałów i poprawną selekcję fotonów o wybranej energii. Różnice w natężeniach pików dla poszczególnych kanałów (patrz rys. 5) wynikają z różnej intensywności promieniowania X padającego na paski detektora (źródło ma charakter punktowy, podczas gdy powierzchnia aktywna detektora to około 1 cm<sup>2</sup>). Szerokości linii energetycznych w przedstawionym widmie są zdeterminowane przez szumy układu i są praktycznie identyczne dla wszystkich kanałów. Obliczone wartości średnie wzmocnień, szumów i ich rozrzuty (odchylenie standardowe) w systemie wielokanałowym zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Wzmocnienie i szumy układu scalonego DEDIX podłączonego do paskowego detektora krzemowego.  
Tab. 1. Gain and noise of DEDIX IC connected to silicon strip detector.

Parametry detektora P / L	Wzmocnienie średnia / sd. [ $\mu$ V/el]	Szumy średnia/sd. [el. rms]
75 $\mu$ m / 1 cm	52.9 / 0.32	136 / 4.4
	55.2 / 0.46	133 / 5.6
100 $\mu$ m / 1 cm	54.8 / 0.35	138 / 3.8
	55.5 / 0.48	137 / 5.8

P (ang. pitch) – odległość między paskami  
L (ang. length) – długość pasków

Kolejnymi istotnymi dla modułu pomiarami testy szybkościowe. Wykonano je na dyfraktometrze, wykorzystując do tego celu promieniowanie o energii 8 keV. Należy wspomnieć, że fotony pochodzące z źródła promieniotwórczego lub lampy rentgenowskiej mają rozkład statystyczny w czasie (statystyka Poissona) i zawsze w systemach odczytowych o architekturze binarnej istnieje pewien procent fotonów, która nie jest rejestrowana wskutek spiętrzeń w torze elektroniki odczytu [7]. W przypadku zbudowanego systemu zależność rejestrowanej liczby zliczeń w pojedynczym kanale w od średniej częstości impulsów wejściowych przedstawia rys. 6. Widać, że w systemie dopiero powyżej średniej częstości 1 miliona impulsów wejściowych na sekundę następuje nasycenie się elektroniki odczytu.



Rys. 6. Rejestrowana liczba zliczeń przez elektronikę odczytu w pojedynczym kanale w zależności od średniej częstości impulsów wejściowych  
Fig. 6. Number of registered counts as function of average rate of input pulses

## 6. Podsumowanie

Zaprezentowany w pracy 128 kanałowy system do obrazowania cyfrowego charakteryzuje się bardzo dobrą jednorodnością parametrów analogowych, przy jednoczesnym niskim poborze mocy (poniżej 5 mW na kanał), niskim poziomem szumów (poniżej 140 el. rms) i poprawną pracą aż do średniej częstości 1 miliona impulsów wejściowych na kanał. Otrzymane wyniki są bardzo obiecujące z punktu widzenia przyszłych zastosowań i w najbliższym czasie przewiduje się wykorzystanie modułu w praktycznych aplikacjach.

## 7. Literatura

- [1] H. J. Besch: Radiation detectors in medical and biological applications. Nucl. Instrum. Methods, vol. 419, 1998, pp. 202-216.
- [2] M. Lindner, L. Blanquart, P. Fischer, H. Kruger, N. Wermes, Medical X-ray imaging with energy windowing. Nucl. Instrum. Methods, vol. 465, 2001, pp. 229-234.
- [3] G. De Geronimo, P. O'Connor, J. Grosholz A generation of CMOS readout ASICs for CZT detector. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol.47, no.6, pp. 1857-1876, Dec. 2000.
- [4] P. Grybos: Low Noise Multichannel Integrated Circuits in CMOS Technology for Physics and Biology Applications. Monography 117, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Cracow, Poland, 2002.
- [5] P. Grybos, et al.: RX64DTH - A fully integrated 64-channel ASIC for a digital X-ray imaging system with energy window selection. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, 2005, pp. 839-846.
- [6] P. Grybos, P. Maj, L. Ramello, K. Swientek: Measurements of Matching and High Count Rate Performance of Multichannel ASIC for Digital X-ray Imaging Systems, submitted to IEEE Trans. Nucl. Sci.
- [7] J. P. Quintana: Practical equation for deadtime determination in X-ray counting system. J. App. Cryst. vol. 24, 1999, pp. 261-262