

Krzysztof KASIŃSKI, Robert SZCZYGIEL

AKADEMIA GÓRNICZO HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA, KATEDRA METROLOGII, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Projekt scalonego wzmacniacza ładunkowego na potrzeby przetwarzania typu Time-over-Threshold

Mgr inż. Krzysztof KASIŃSKI

Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Obecnie asystent w Katedrze Metrologii tego Wydziału. Jego zainteresowania naukowe obejmują między innymi projektowanie specjalizowanych układów scalonych oraz systemów kontrolno-pomiarowych.



e-mail: kasinski@agh.edu.pl

Dr inż. Robert SZCZYGIEL

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



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

Streszczenie

Praca przedstawia projekt scalonego wzmacniacza ładunkowego zaprojektowanego dla aplikacji w układzie do odczytu detektorów paskowych w eksperymencie fizyki wysokich energii wykorzystującego przetwarzanie typu Time-over-Threshold. Zastosowane rozwiązania zostały zapożyczone z układów pikselowych. Projekt wykonano dla technologii United Microelectronics Corporation 180 nm. Zaprojektowany wzmacniacz charakteryzuje się niskim poborem mocy, niskimi szumami a także bardzo szerokim zakresem liniowej pracy zachowując swoje właściwości dla obu polarności ładunków wejściowych.

Słowa kluczowe: układ scalony, technologia CMOS, krzemowy detektor paskowy Time-over-Threshold, wzmacniacz ładunkowy.

Design of the integrated charge-sensitive amplifier for the Time-over-Threshold based processing

Abstract

New High Energy Physics experiments require new and better solutions for the detector readout systems. This paper presents the project of the charge sensitive amplifier (CSA) for the silicon strip detector readout chip implementing the Wilkinson-type analog to digital converter (called also Time-over-Threshold processing). This allows to implement the reasonable resolution and speed ADC in each channel while keeping the overall power consumption low. This is due to the fact that the information about the input charge is kept in the CSA output pulse length and can be then easily converted to digital domain. It has been designed for the UMC (United Microelectronics Corporation) 180nm technology and should fit into 50 μm pitch channel slot. Some solutions were adapted from the pixel-oriented integrated circuits and are optimized for much higher detector capacitances. Presented charge sensitive amplifier shows very high dynamic range – much higher than required 0-16 fC. The dynamic range is not limited by the dynamic range of the amplifier itself which is a feature of the implemented discharge circuit. The processing chain has an ability to operate for both holes and electrons while keeping the low power consumption (625 μW) and low noise (720 e- at 30 pF detector capacitance). The paper presents the simulation-based performance of the circuit.

Keywords: integrated circuit, CMOS technology, silicon strip detector, Time-over-Threshold, charge sensitive amplifier, CSA.

1. Wprowadzenie – obrazowanie z wykorzystaniem detektorów krzemowych

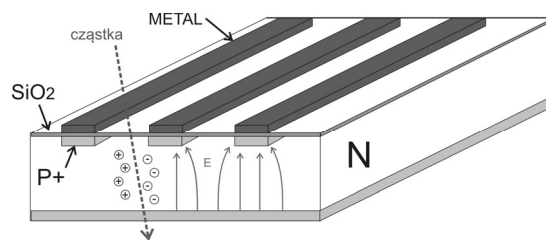
Krzemowy detektor paskowy lub pikselowy składa się z układu diod spolaryzowanych w kierunku zaporowym zbudowanych na wspólnym podłożu z wysokoomowego krzemu. Obszary domieszkowane tworzą paski (w detektorach paskowych) lub piksele (w detektorach tzw. pikselowych) będące elementami detekcyjnymi. Rodzaj detektora determinuje możliwość lokalizacji miejsca

kontakty kwantu promieniowania lub cząstki z detektorem w jednym lub dwóch wymiarach. Detektor paskowy pozwala na uzyskanie jednowymiarowego obrazu o rozdzielczości określonej odstępem pomiędzy paskami (typowo 25 – 100 μm) [1].

Wskutek interakcji z fotonem w obszarze warstwy zubożonej generowana jest pewna liczba par dziura-elektron. Ich liczba jest zależna od energii cząstki (fotonu) oraz od współczynnika konwersji, który dla krzemu wynosi 3.6 eV/parę. Przykładowo, foton promieniowania X o energii 17,4 keV (Molibden) wygeneruje w detektorze 4833 par elektron-dziura.

W przypadku aplikacji dla Fizyki Wysokich Energii do czynienia mamy z cząstkami, które nie zatrzymują się w detektorze ale przelatując przez niego wytracają nieznacznie część swojej energii. Aplikacje takie zwane są detektorami śladowymi, ponieważ ich zadaniem jest wyznaczenie ścieżki, jaką pokonała dana cząstka. Z definicji cząstka minimalnie jonizująca (1 MIP) generuje na swojej drodze 77 par elektron-dziura na każdy 1 μm drogi w detektorze. A więc przykładowo dla detektora o grubości 300 μm liczba wygenerowanych par wyniesie 23000.

Wygenerowany ładunek jest zbierany na paskach detektora tworząc krótki - około 5-20 ns (w zależności od grubości detektora i napięcia polaryzacji)- impuls prądowy [2].



Rys. 1. Zasada działania detektora paskowego
Fig. 1. The principle of the strip detector operation

W celu wykorzystania detektora jako urządzenia do obrazowania lub badania rozkładu przestrzennego toru cząstek każdy z pasków (pikseli) powinien być zaopatrzony w elektronikę odczytu. Ponieważ rozsądną rozdzielczość uzyskuje się korzystając z wielu dziesiątek lub setek pasków (dziesiątek lub setek tysięcy pikseli) rozmiary elektroniki odczytu powinny być porównywalne z wielkościami charakterystycznymi detektora a więc odstępami między paskami lub powierzchnią piksela. Stwarza to poważne ograniczenia na powierzchnię zajmowaną przez układ jak i moc przez niego pobieraną i wymaga tworzenia wielokanałowych układów scalonych wykonywanych w technologiach submikro-nowych.

2. Wprowadzenie – elektronika odczytu

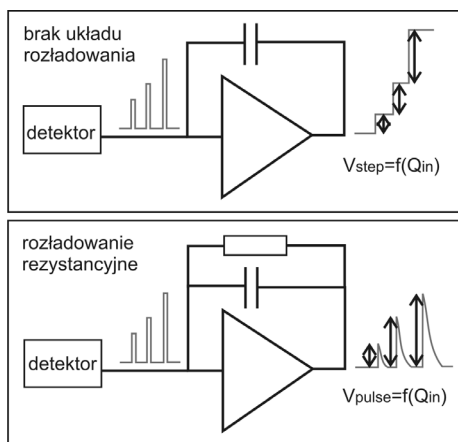
Impuls prądowy jest całkowany we wzmacniaczu ładunkowym wskutek czego na jego wyjściu pojawia się skok napięcia proporcjonalny do całkowitego ładunku niesionego przez impuls prądowy i odwrotnie proporcjonalny do pojemności sprzężenia zwrotnego. Zakładając, że wzmacniacz jest idealny, wzmocnienie napięciowe wzmacniacza ładunkowego można zapisać jako:

$$V_{steo} = \frac{-Q_{in}}{C_f}, \quad (1)$$

gdzie:

- V_{steo} - amplituda skoku napięcia,
- C_f - pojemność w sprzężeniu zwrotnym,
- Q_{in} - ładunek wejściowy.

Aby zapobiec spiętrzaniu się kolejnych impulsów stosuje się układy rozładowania – ich zadaniem jest usunąć zgromadzony w kondensatorze sprzężenia zwrotnego ładunek zanim nadejdzie kolejny impuls. Najprostszym układem rozładowania jest rezystor włączony równoległe z kondensatorem sprzężenia. Impuls jest wtedy rozładowywany eksponentalnie zgodnie ze stałą czasową określoną przez kondensator i rezystancję sprzężenia.



Rys. 2. Prace wzmacniacza ładunkowego z i bez układu rozładowania

Fig. 2. The charge sensitive amplifier operations with and without reset circuit

Układy elektroniczne, które znajdują się za wzmacniaczem ładunkowym zależą od specyfiki docelowej aplikacji. Ogólnie rzecz biorąc wymaganiami stawianymi przed układami elektroniki odczytu są:

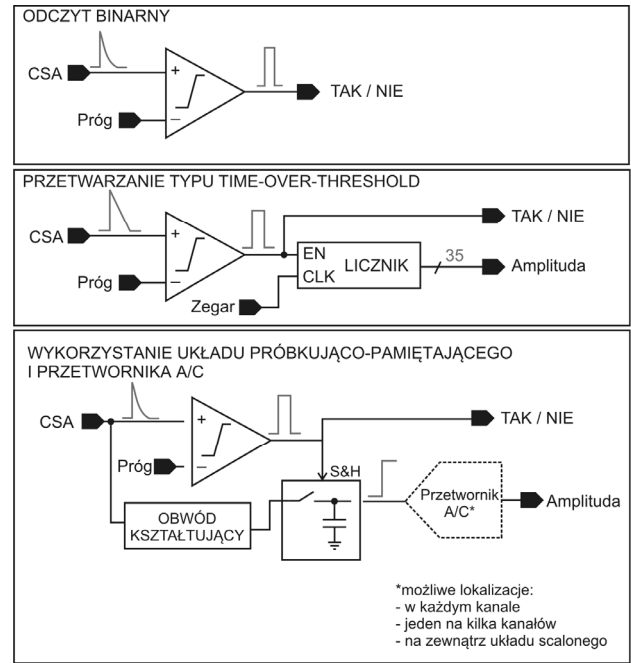
- wykrycie faktu zdeponowania ładunku w detektorze (odczyt binarny),
- możliwość pomiaru ładunku zdeponowanego (spektrometria amplitudowa),
- możliwość pomiaru czasu wystąpienia zdarzenia (spektrometria czasowa),

W zakresie spektrometrii amplitudowej można rozróżnić trzy rodzaje przetwarzania stosowane w układach elektroniki odczytu:

- odczyt binarny (detekcja wystąpienia zdarzenia),
- odczyt metodą Time-over-threshold,
- odczyt z wykorzystaniem jednego przetwornika A/C na wiele kanałów.

Odczyt binarny sprawdza się dobrze w szczególnych warunkach (np. w przypadku monoenergetycznej wiązki). Zastosowanie przetwornika analogowo-cyfrowego byłoby najlepszym rozwiązaniem jednak wymaga to zawsze znalezienia kompromisu pomiędzy poborem mocy, zajmowaną powierzchnią, szybkością działa-

nia i rozdzielczością co nie zawsze jest możliwe. Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie przetwarzania metodą Time-over-Threshold a więc zamiast pomiaru amplitudy impulsów mierzy się czas ich trwania. Jest to tzw. przetwornik A/C Wilkinsona. Pozwala zaoszczędzić moc zachowując rozsądną rozdzielczość pomiaru w każdym kanale a więc i wysoką szybkość działania układu.

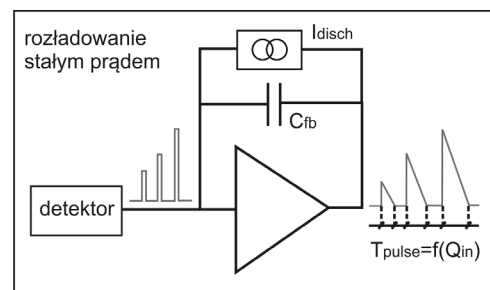


Rys. 3. Rodzaje elektroniki odczytu z zastosowaniem spektrometrii amplitudowej

Fig. 3. Types of the readout circuits applied to the amplitude spectrometry

3. Cel projektu

Celem projektu było przygotowanie wzmacniacza ładunkowego wraz z układem rozładowania do zastosowania w układzie do odczytu krzemowych detektorów paskowych o dużej pojemności (30 pF) umożliwiającego pracę zarówno z dziurami jak i elektronami. Zakładaną aplikacją docelową jest detektor śladowy w eksperymencie fizyki wysokich energii. Nominalny zakres powinien wynosić 0,5 – 16 fC, czas rozładowania impulsu 4 fC: 600 ns a pobierana moc powinna być możliwie mniejsza niż 1,5 mW. Docelową metodą przetwarzania jest Time-over-Threshold.



Rys. 4. Praca wzmacniacza ładunkowego z układem rozładowania stałym prądem

Fig. 4. Amplifier operation with the constant current discharge circuit

Spotykane w literaturze rozwiązania [3, 4, 5] dla detektorów paskowych wykorzystują wzmacniacz ładunkowy z rozładowaniem o charakterystyce rezystancyjnej zaopatrzonego w układ kształtujący w postaci filtrów. Rozwiązanie takie niestety nie pozwala na uzyskanie liniowej charakterystyki przetwarzania (długość trwania impulsu w funkcji ładunku wejściowego).

Sposobem na uzyskanie liniowości jest zbudowanie układu sprzężenia, które będzie rozładowywać kondensator stałym prądem. Rozwiązania takie stosowane są w układach pracujących z detektorami pikselowymi a więc mających niewielką pojemność [6, 7].

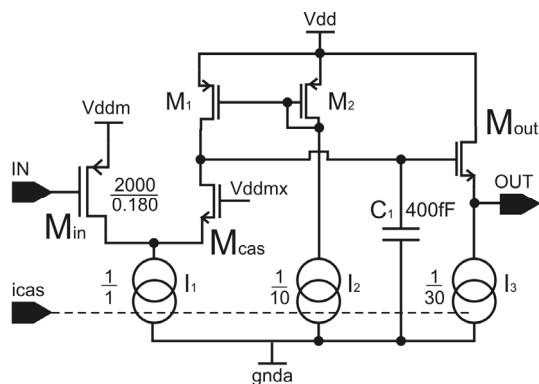
Przedstawiony poniżej projekt jest zoptymalizowany szumowo pod kątem wykorzystania z detektorem paskowym o dużej pojemności, możliwością pracy z oboma polarnościami ładunków oraz uzyskania liniowej charakterystyki przetwarzania przy zachowaniu niskich szumów i ograniczenia pobieranej mocy do mniej niż 1 mW.

4. Wzmacniacz ładunkowy

Aby zapewnić poprawną pracę wzmacniacza ładunkowego, wzmacniacz powinien nie tylko charakteryzować się odpowiednio dużym wzmocnieniem, i pasmem oraz możliwie niskim szumem i bardzo małym wejściowym prądem polaryzacji ale równocześnie powinien spełniać rygorystyczne ograniczenia nałożone na moc i zajmowaną powierzchnię.

Prezentowany wzmacniacz składa się ze stopnia wejściowego opartego na układzie zawiniętej kaskody oraz stopnia buforującego (wtórniki źródłowy). Zaletą tej architektury jest jej wysokie wzmocnienie przy zachowaniu niskiego poboru mocy.

Wybór tranzystora wejściowego jako PMOS był podyktowany niższym szumem $1/f$ w stosunku do tranzystora typu NMOS. Jego wymiary zostały zoptymalizowane dla uzyskania najmniejszych szumów przy zadanej pojemności detektora mając na uwadze ograniczenia powierzchniowe. Jako nominalny prąd pracy tranzystora wejściowego przyjęto $500 \mu\text{A}$ [2].



Rys. 5. Uproszczony schemat wzmacniacza
Fig. 5. Simplified amplifier schematic

Źródło tranzystora wejściowego M_{in} jest podłączone do niższego napięcia niż pozostała część wzmacniacza. Ponieważ pierwszy tranzystor pobiera prawie 90% prądu całego wzmacniacza obniżenie tego napięcia pozwala na znaczną redukcję poboru mocy. Jednocześnie następuje odseparowanie tranzystora M_{in} od ewentualnych zakłóceń wnikających z dalszych stopni poprzez zasilanie.

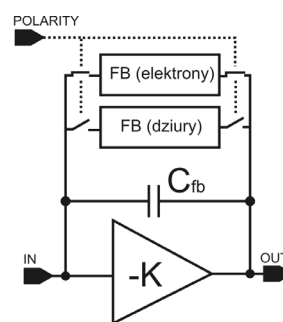
Pojemność sprzężenia zwrotnego w której całkowany jest ładunek wpływający do wzmacniacza wynosi 20 fF. Została dobrana tak, aby zapewnić odpowiednie wzmocnienie wzmacniacza.

Kondensator C_1 zapewnia układowi stabilność i został dobrany tak, aby dla pojemności sprzężenia równej 20 fF margines fazy wynosił 79° .

O ile stosunek prądów płynących w poszczególnych gałęziach wzmacniacza jest stały to zachowano możliwość modyfikacji ich wartości przez zewnętrzny rezystor.

Tab. 1. Parametry wzmacniacza
Tab. 1. Parameters of the amplifier

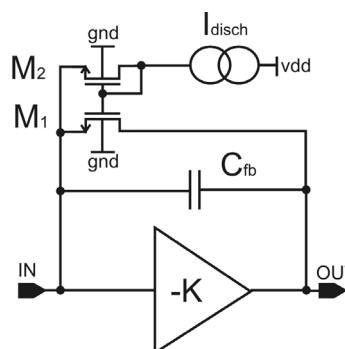
Wzmocnienie	1600 V/V
Pasmo	760 kHz
Moc	$625 \mu\text{W}$
Margines fazy	79°



Rys. 6. Konfiguracja z przełączanymi układami rozładowania
Fig. 6. Switchable discharge circuit architecture

5. Układ rozładowania

Analizując wiele ze stosowanych układów rozładowania wybrano schemat prezentowany m.in. przez P. Fischera (rys. 7) [8]. Jest stosunkowo prosty ale skutecznie realizujący ideę rozładowania stałym prądem umożliwiając tym samym realizację liniowej charakterystyki przetwarzania.

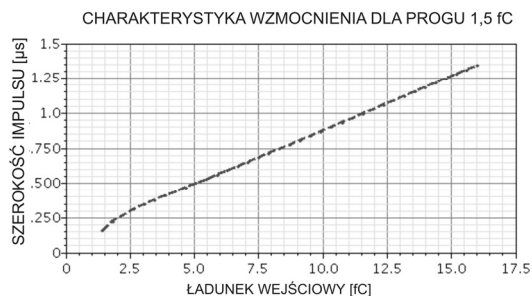


Rys. 7. Uproszczony schemat układu rozładowania dla jednej polarności
Fig. 7. Simplified schematic of the discharge circuit for one input charge polarity

Układ ten jest oparty na idei lustra prądowego. Prąd z zewnętrznej referencji odbijany w lustrze tworzącym źródło I_{disch} i płynie cały czas przez tranzystor M_2 . W zależności od stanu wzmacniacza ładunkowego (jałowy lub po wstrzyknięciu ładunków) prąd płynący przez tranzystor M_1 zmienia kierunek.

W trakcie pracy jałowej cały prąd płynący przez M_2 przepływa przez odwrotnie spolaryzowany M_1 . W momencie nadejścia impulsu V_{gs} tranzystora M_1 wzrasta i zaczyna on pracować jak lustro prądowe pompując prąd w przeciwnym kierunku niż poprzednio rozładowując kondensator sprzężenia zwrotnego.

Nieliniowość pracy wprowadza stan, gdy tranzystor M_1 nie jest jeszcze w stanie nasycenia a więc: dla bardzo małych impulsów jak i w końcowym etapie rozładowania nawet dużych impulsów. Wynikiem tego efektu jest nieliniowość charakterystyki przetwarzania dla małych ładunków wejściowych (rys. 8).



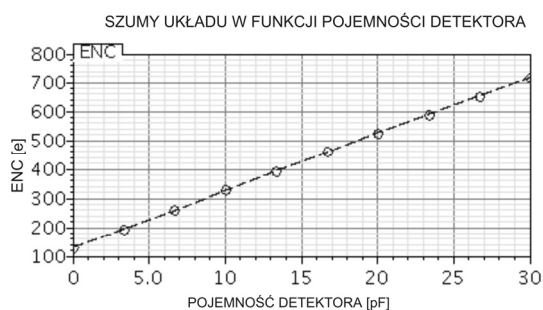
Rys. 8. Charakterystyka przetwarzania prezentowanego wzmacniacza ładunkowego zakładając próg 1,5 fC

Fig. 8. Transfer function of the presented charge amplifier for the threshold of 1.5 fC

Niestety układ ten może pracować z tylko jedną polarnością impulsów. Problem ten rozwiązano przez zastosowanie dwóch, przełączalnych bramkami transmisyjnymi, lustrzanych układów sprzężeń (rys. 6). W zależności od rodzaju podłączonego detektora konfiguracja polaryzacji odbywa się zewnętrznie.

6. Wyniki symulacji

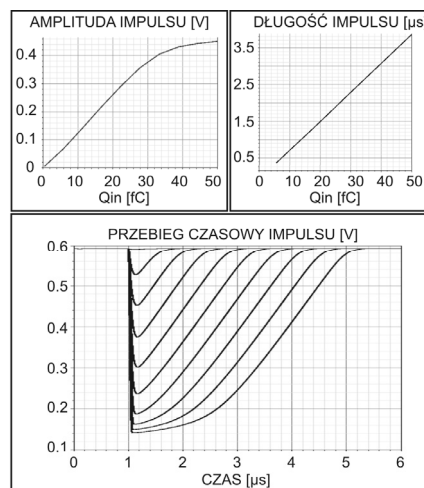
Prezentowane rozwiązanie charakteryzuje się liniową pracą w szerokim zakresie ładunków wejściowych oraz niskimi szumami.



Rys. 9. Charakterystyka szumu w funkcji pojemności detektora

Fig. 9. Noise (ENC) as a function of the detector capacitance

Warto zaznaczyć, że zasada pracy układu umożliwia poprawną pracę nawet w przypadku przeciążenia amplitudowego. Pomimo nasycenia wzmacniacza, czas trwania impulsu wyjściowego jest nadal liniową funkcją ładunku wejściowego (rys. 10). Rozładowanie stałym prądem skutkuje liniową charakterystyką przetwarzania daje dobre perspektywy do wykorzystania w przetwarzaniu metodą „Time-over-Threshold”.



Rys. 10. Symulacja przebiegu napięcia wyjściowego dla różnych ładunków wejściowych (0,2 – 40 fC) przy pojemności detektora 30 pF. Ilustracja braku wpływu nasycenia wzmacniacza na charakterystykę przetwarzania

Fig. 10. Output voltage simulation for various input charges (0.2 – 40 fC) and detector capacitance 30 pF. Saturation of the amplifier's output has no impact on the pulse length linearity

Praca ta powstała przy wsparciu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

7. Literatura

- [1] Gryboś P., Dąbrowski W.: Wykorzystanie paskowych detektorów krzemowych w dyfraktometrii promieniowania X. *Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji* 48 (2002), z. 2, 435-448.
- [2] Dąbrowski W.: Elektronika front-end do krzemowego detektora torów w eksperymencie ATLAS. *Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji* 48 (2002), z. 2, 247-270.
- [3] Manfredi P.F., Leona A., Mandelli E., Perazzo A., Re V.: Noise limits in a front-end system based on time-over-threshold signal processing. *Nuclear Instruments and Methods In Physics Research A*, 439 (2000), 361-367.
- [4] Delagnes E., Abbon P., Bedfer Y., Faivre J.C., Kunne F., Magnon A., Platchkov S., Rebourgeard P., Thers D.: SFE16, a Low Noise Front-End Integrated Circuit Dedicated to the Read-out of Large Micromegas Detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 47 (2000), No. 4, 1447-1453.
- [5] Kipnis I. et al: A Time-over-Threshold Machine: the Readout Integrated Circuit for the BaBar Silicon Vertex Tracker, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 44 (1997), No.34, 289-297.
- [6] Berg C., Blanquart L., Bonzom V., Delpierre P., Desch K., Fischer P., Keil M., Meuser S., Raith B., Wermes N., Bier & Pastis, a pixel readout prototype chip for LHC. *Nuclear Instruments and Methods In Physics Research A*, 439 (2000), 80-90.
- [7] Huegging F.: On behalf of the ATLAS Pixel Collaboration, Front-End electronics and integration of ATLAS pixel modules. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 549 (2005), 157-164.
- [8] Rossi L., Fischer P., Rohe T., Wermes N.: *Pixel Detectors: From Fundamentals to Applications*, Springer (2006).

otrzymano / received: 02.07.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.08.2010

artykuł recenzowany