

System do testowania specjalizowanych układów scalonych do odczytu detektorów paskowych

Krzysztof Kasiński

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Metrologii

Streszczenie: Artykuł przedstawia wybrane metody testowania specjalizowanych układów scalonych (ASIC) do odczytu paskowych detektorów krzemowych pod kątem ekstrakcji wybranych parametrów toru analogowego z uwzględnieniem zarówno stosowanego sprzętu, jak i oprogramowania. Jako przykładową aplikację wybrano system testowy dla układu ASIC TOT01, wyprodukowanego jako układ prototypowy dla potrzeb detektora STS w eksperymencie CBM.

Prezentowany system służy do pomiaru ilości energii zdeponowanej w detektorze krzemowym wskutek interakcji z cząstką lub kwantem promieniowania z wykorzystaniem metody *time-over-threshold*. W każdym kanale układu TOT01 znajdują się m.in. wzmacniacz ładunkowy, dyskryminator z histerezą oraz korekcyjny układ cyfrowo-analogowy.

Odpowiedni dobór sprzętu pomiarowego, niskoszumnych zasilaczy i generatorów oraz zapewnienie ich zdalnej pracy pod nadzorem dedykowanego oprogramowania są bardzo ważne. Niewielkie wymiary samego układu ($1,5 \times 3,4 \text{ mm}^2$) oraz mnogość wyprowadzeń (81), obecność domen niskoszumnych analogowych oraz cyfrowych, konieczność podłączenia układu do detektora krzemowego i zapewnienia możliwości pracy całego systemu w warunkach promieniowania X nakładają również bardzo wysokie wymagania na obwód drukowany.

Słowa kluczowe: system pomiarowy, specjalizowane układy scalone, testowanie

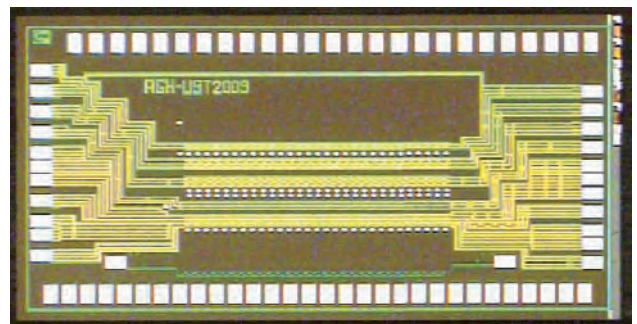
1. Wstęp

Nowoczesne specjalizowane układy scalone wykonywane w technologiach submikronowych wymagają budowania zaawansowanych systemów do ich testowania i charakteryzacji parametrycznej. Coraz większe możliwości takich układów stawiają bardzo wysokie wymagania aparaturze pomiarowej. Jednocześnie mnogość funkcji, niekiedy duża liczba kanałów, jakie ma dany układ scalony, znacząco utrudniają (a często uniemożliwiają) ręczne testowanie i pomiary z wykorzystaniem standardowego sprzętu laboratoryjnego.

Artykuł przedstawia wybrane metody testowania specjalizowanych układów scalonych do odczytów paskowych detektorów krzemowych z uwzględnieniem zarówno stosowanego sprzętu, jak i oprogramowania. Jako przykładową aplikację wybrano system testowy dla układu ASIC TOT01. Wyniki pomiarów wykonanych za pomocą systemu oraz detale architektury układu TOT01 zostały opublikowane w innym artykule [2].

2. Układ TOT01 – zasada działania

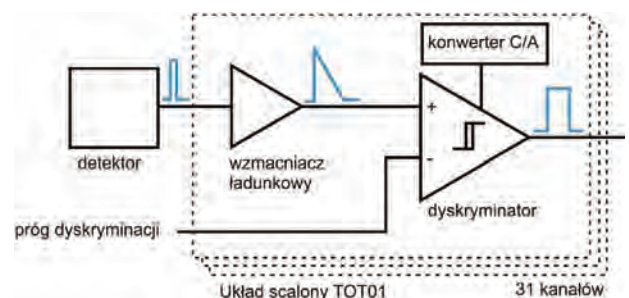
Układ TOT01 (rys. 1) zaprojektowany został jako prototypowy układ dla potrzeb detektora STS (*Silicon Tracking System*) w eksperymencie CBM (*Compressed Baryonic Matter*) w ośrodku GSI w Niemczech. Jest to 31-kanałowy układ scalony do odczytu paskowych detektorów krzemowych wyprodukowany w technologii UMC 180 nm [2].



Rys. 1. Mikrofotografia układu TOT01

Fig. 1 TOT01 ASIC microphotograph

Jego funkcjonalność to pomiar ilości energii zdeponowanej w detektorze krzemowym wskutek interakcji z cząstką lub kwantem promieniowania. W swojej strukturze zawiera m.in. wzmacniacz ładunkowy, dyskryminator z histerezą oraz korekcyjny przetwornik cyfrowo-analogowy (rys. 2). Zasada pomiaru wykorzystuje metodę *time-over-threshold*, gdzie informacja o ilości wygenerowanego ładunku kryje się w długości impulsu wyjściowego z dyskryminatora. Ładunek zdeponowany w detektorze wpływa do wzmacniacza ładunkowego, gdzie jest całkowany, a więc generuje skok napięcia na wyjściu wzmacniacza. Układ rozładowania stałym prądem kształtuje impulsy ze zboczem opadającym o stałym nachyleniu, dzięki czemu czas trwania tych impulsów jest



Rys. 2. Zasada działania i uproszczona struktura wewnętrzna układu TOT01

Fig. 2. Idea of operations and simplified internal structure of TOT01 ASIC

proporcjonalny do zdeponowanego ładunku. Pozwala to na realizację pomiaru w prosty sposób przy wykorzystaniu tylko komparatora. Impulsy wyjściowe ze wzmacniacza ładunkowego są następnie porównywane z progiem dyskryminacji (ustawianym zewnętrznie), w wyniku czego uzyskuje się cyfrowe już impulsy stanowiące wyjście układu (rys. 2). TOT01 zajmuje powierzchnię krzemu równą $1,5 \times 3,4 \text{ mm}^2$ i ma 81 wyprowadzeń (rys. 1).

3. Ekstrakcja parametrów układu

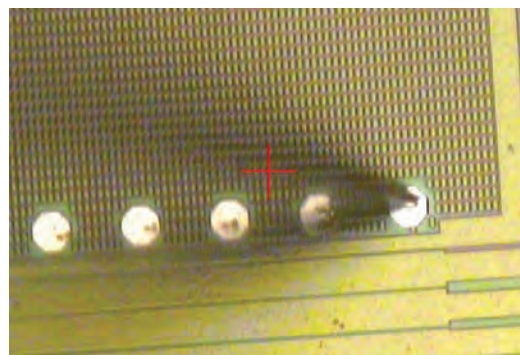
Do podstawowych parametrów charakteryzujących układ scalony TOT01 można zaliczyć: wzmocnienie napięciowe, szumy, zakres dynamiczny, jednorodność tych parametrów (we wszystkich kanałach) oraz pobór mocy (cały układ oraz w przeliczeniu na jeden kanał).

Dany układ scalony zawsze jest projektowany tak, aby uzyskać parametry spełniające wymagania aplikacji, jednak z różnych względów (m.in. rozrzutów produkcyjnych) rzeczywiste parametry układu różnią się od zakładanych, w związku z czym po wyprodukowaniu należy układ scharakteryzować.

W rozważanym przypadku mamy do czynienia z układem scalonym, co ogranicza dostęp do sygnałów wewnątrz układu, w związku z czym część parametrów jest mierzona pośrednio. Zazwyczaj w układach prototypowych stosuje specjalne pady testowe. Są to pola kontaktowe o wymiarach znacznie mniejszych (średnica ok. $30 \mu\text{m}$) niż standardowe (ok. $100 \times 100 \mu\text{m}$). Możliwe jest, z wykorzystaniem technik ostrzowych i stacji pomiarowej z mikroskopem, wykonanie tymczasowego połączenia z takim padem w celu obserwacji sygnału również wewnątrz układu, jednak rozwiązanie to ma szereg wad i jest stosowane tylko w ostateczności (rys. 3).

O ile pewne parametry (np. pobór mocy) można zmierzyć wprost (korzystając z multimetru lub zaawansowanego zasilacza), o tyle pomiar pozostałych parametrów analogowych wymaga zastosowania specjalnych metod ich ekstrakcji wykorzystujących wyjścia o cyfrowym charakterze.

W układach odczytowych dla detektorów krzemowych z odczytem binarnym (generowany jest cyfrowy impuls, jeśli mierzony ładunek przekracza wartość progową) typową metodą ekstrakcji wzmocnienia oraz szumu jest przeprowadzenie skanu progów dyskryminacji. Wstrzykując na wejście testowanego układu/kanału znany ładunek, rejestruje się liczbę wykrytych przez układ scalony „zdarzeń” przy konkretnym progu dyskryminatora. Zmieniając napięcie progowe, można wykreślić krzywą obrazującą liczbę zdarzeń w funkcji progów dyskrymi-



Rys. 3. Mikrofotografia kontaktu testowego z przyłożoną wolframową igłą pomiarową

Fig. 3. Test pad microphotograph with a tungsten needle probe attached

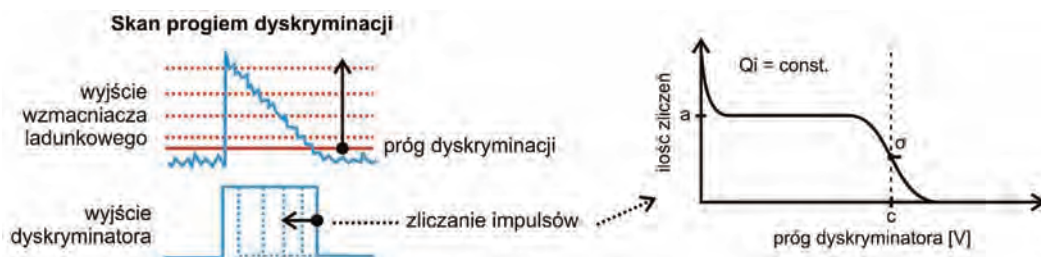
natora (rys. 4). Krzywa ta jest nazywana s-krzywą ze względu na swój kształt. Zbierając zestaw s-krzywych zarejestrowanych dla różnych wartości wstrzykniętych ładunków i wyznaczając moment przejścia krzywej (c), można wykreślić charakterystykę wzmocnienia napięciowego układu. Jest to w istocie zbiór punktów reprezentujących napięcie progowe, dla którego nastąpiło przejście s-krzywej w funkcji ładunku wstrzykniętego. Na podstawie takiej charakterystyki można wyznaczyć wzmocnienie napięciowe układu A_v wyrażonego najczęściej w mV/fC .

W układzie bezszumnym przejście s-krzywej byłoby natychmiastowe, jednak obecność szumu powoduje jego rozmycie. Zakładając, że w układzie występuje szum biały, metodą na ekstrakcję szumu z s-krzywej jest dopasowanie do niej parametrów zmodyfikowanej funkcji błędu, które można następnie przeliczyć na odchylenie standardowe szumu oraz pozycję środka przejścia (dla celów wyznaczenia charakterystyki wzmocnienia). Tutaj wykorzystywana jest funkcja błędu *erf*, którą można ją zapisać następująco:

$$y = \frac{a}{2} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - c}{\sqrt{2} \cdot \sigma} \right) \right]$$

gdzie: a – nominalna liczba zliczeń, c – napięcie przejścia s-krzywej, σ – odchylenie standardowe szumu (rys. 4).

Po dopasowaniu takiej funkcji otrzymujemy wprost wartość odchylenia standardowego napięcia na wyjściu wzmacniacza ładunkowego (wyrażonego w V). W literaturze przy charakteryzacji parametrycznej wzmacniaczy ładunkowych najczęściej spotyka się inną wartość wyrażającą szum – ENC (*Equivalent Noise Charge*), czyli równoważny ładunek szumowy wyrażony najczęściej w fC lub elektro-



Rys. 4. Idea pomiarów z wykorzystaniem skanu progów dyskryminacji

Fig. 4. Threshold scan based measurement

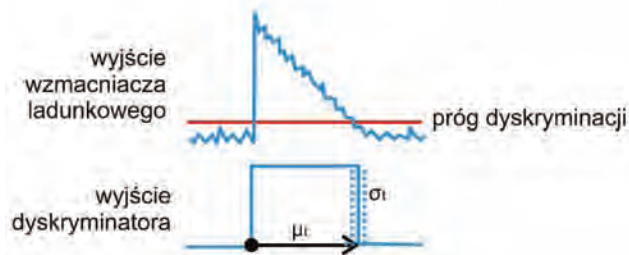
nach. Aby przeliczyć szum wyrażony w ten sposób na ENC należy użyć równania:

$$ENC = \frac{\sigma}{A_v}$$

gdzie A_v to wzmocnienie napięciowe wzmacniacza ładunkowego.

Układ TOT01, w przeciwieństwie do układów z odczytem binarnym, pozwala na pomiar ilości ładunku wygenerowanego w detektorze przez pomiar długości trwania impulsu wyjściowego z dyskryminatora (rys. 5). Możliwa jest zatem ekstrakcja ENC również na podstawie statystycznej obserwacji długości trwania impulsów wyjściowych z układu.

Tym razem zakłada się stały próg dyskryminacji. Można



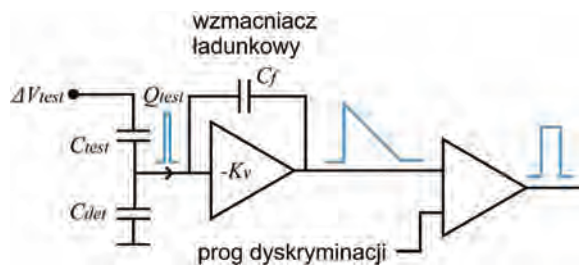
Rys. 5. Idea analizy długości trwania impulsu wyjściowego dla ekstrakcji parametrów analogowych

Fig. 5. Analog parameters' extraction using output pulse length analysis

wykreślić charakterystykę średniej długości impulsu wyjściowego (μ_t) w funkcji ładunku wejściowego. Współczynnik kierunkowy otrzymanej prostej A_t można wyrazić w $\mu s/fC$ i jest on odpowiednikiem wzmocnienia napięciowego A_v w poprzednim podejściu. Można zatem wyznaczyć wartość ENC, korzystając ze wzoru:

$$ENC = \frac{\sigma_t}{A_t}$$

Wstrzykiwanie ładunku testowego realizuje się poprzez wymuszenie skoku napięcia na kondensatorze C_{test} o niewielkiej pojemności (rys. 6). W układach scalonych tego typu w każdym kanale dodaje się taki kondensator, aby umożliwić wstępne przetestowanie każdego egzemplarza przed instalacją w docelowej aplikacji. Ładunek wstrzyknięty do wzmacniacza ładunkowego jest równy [1]:



Rys. 6. Metoda wstrzykiwania ładunku testowego do wzmacniacza ładunkowego

Fig. 6. Test charge injection method

$$Q_{test} = \Delta V_{test} \cdot \frac{C_{test}}{1 + \frac{C_{test}}{C_{det} + (K_v + 1)C_f}} \approx \Delta V_{test} \cdot C_{test} \quad \left| C_{test} \ll C_{det} \ll (K_v + 1)C_f \right.$$

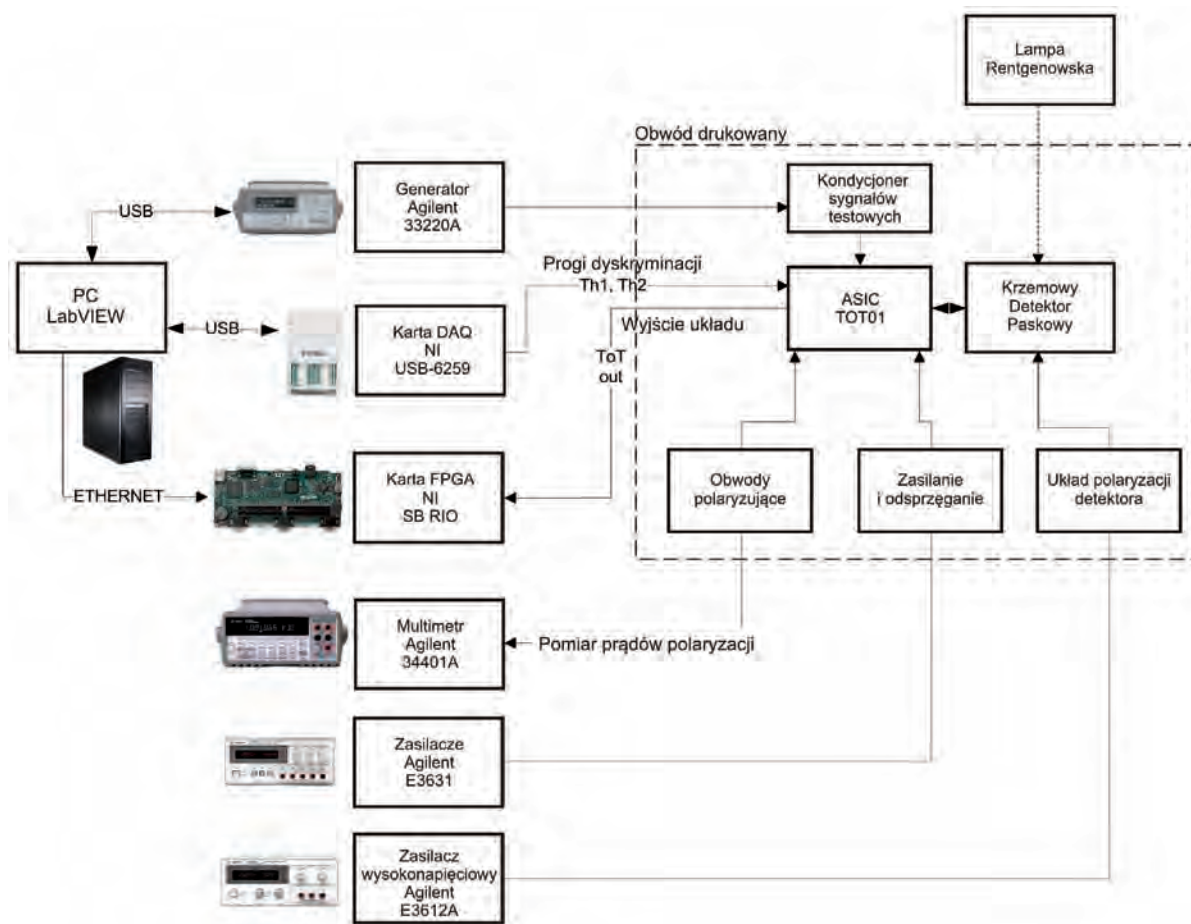
gdzie: Q_{test} – ładunek wstrzyknięty do wzmacniacza, V_{test} – skok napięcia na kondensatorze, C_{test} – pojemność kondensatora testowego, C_{det} – pojemność detektora, C_f – pojemność kondensatora w sprzężeniu zwrotnym wzmacniacza ładunkowego, K_v – wzmocnienie wzmacniacza.

W praktyce podany warunek jest spełniony, więc cały ładunek jest wstrzyknięty do wzmacniacza ładunkowego. O ile wykorzystanie zewnętrznego generatora i wbudowanego w układ scalony kondensatora do wstrzykiwania testowych ładunków jest rozwiązaniem elastycznym i łatwym do zrealizowania w laboratorium, to wyniki uzyskane w ten sposób obarczone są, niestety, znaczną niepewnością (przede wszystkim rozrzutem rzeczywistej pojemności kondensatora). W celu precyzyjnego wyznaczenia wzmocnienia danego kanału wykorzystuje się źródła promieniowania, których energie są ściśle określone. Rejestrując skany progiem dyskryminacji przy wykorzystaniu źródeł promieniowania o różnych energiach, można bardzo precyzyjnie wyznaczyć wzmocnienie testowanego układu.

4. Sprzętowe aspekty testowania układu

Do scharakteryzowania układu TOT01 zbudowano system złożony z wielu komponentów współpracujących pod kontrolą komputera PC (rys. 7). Elementem centralnym jest obwód drukowany zawierający najważniejsze układy z punktu widzenia funkcjonowania układu scalonego (rys. 8). Są to m.in.:

- miejsce na układ scalony wraz z padami do wykonania połączeń drutowych metodą ultrakompresji,
- miejsce na detektor krzemowy z układem do jego polaryzacji wysokim napięciem wraz z zestawem filtrów (ferrytowy filtr zakłóceń wspólnych oraz filtry RC),
- otwory montażowe dla metalowej osłony układu scalonego z detektorem z okienkiem przepuszczającym promieniowanie X,
- układy do polaryzacji układu scalonego zrealizowane jako zestaw rezystorów stałych i precyzyjnych potencjometrów wielobrotowych pozwalających na zmianę prądów polaryzacji w pewnym zakresie; przewidziano zworki pozwalające na włączenie w obwód precyzyjnego mikroamperomierza,
- zestaw liniowych regulatorów napięć na potrzeby zasilania poszczególnych sekcji układu scalonego, ze szczególnym uwzględnieniem niskoszumnych stabilizatorów dla sekcji analogowych oraz odpowiedniego odsprzęgania przede wszystkim sekcji cyfrowych; zachowano możliwość przełączenia obwodu na zasilanie zewnętrzne,
- wyprowadzenia dla sygnałów komunikacyjnych układu scalonego, także dla napięć progowych doprowadzanych z zewnątrz,
- opcjonalnie można stworzyć autonomiczny system pomiarowy poprzez dodanie układu FPGA zaopatrzonego w zewnętrzną pamięć, układ cyfrowo-analogowy (ustawianie progów dyskryminatora) oraz konwertera RS-232–USB do komunikacji z komputerem PC; w ten sposób



Rys. 7. System do testowania układu TOT01

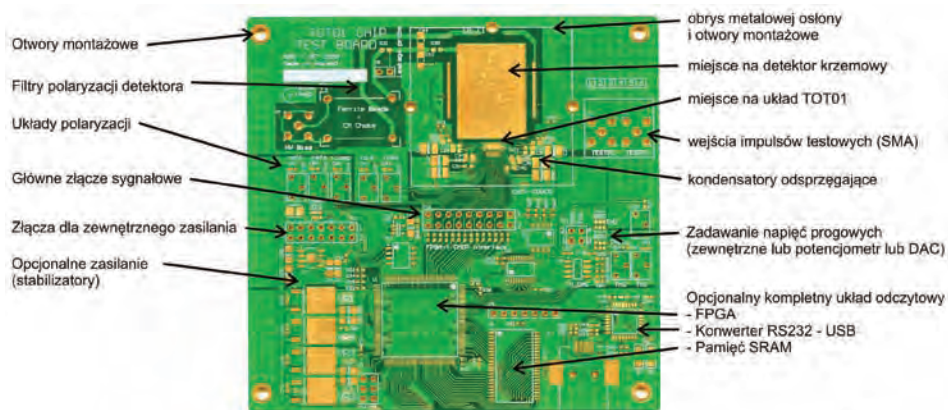
Fig. 7. TOT01 ASIC test system

można uprościć cały system do komputera PC, płytki drukowanej i zewnętrznego generatora lub lampy rentgenowskiej, jednak do celów badawczych i testowych bardziej elastyczne jest korzystanie z przyrządów laboratoryjnych umożliwiających zdalną kontrolę z poziomu centralnego komputera.

Niewielkie wymiary układu scalonego narzucają wysokie wymagania na technologię wykonania obwodu drukowanego. Cztery domeny zasilania (2 analogowe i 2 cyfrowe) powodują, że należy dużo uwagi poświęcić rozprowadzeniu linii zasilających oraz masy, tak aby zminimalizować przenikanie zakłóceń między tymi domenami, a także zapewnić odpowiednie odprężenie. Płytką jest 6-warstwowa, a minimalna szerokość ścieżki, którą zastosowano w krytycznych miejscach, wynosi 4 milsy (1 mil = 1/1000 cala).

Do charakteryzacji parametrycznej układu użyto różnych przyrządów laboratoryjnych połączonych z komputerem. Generator arbitralny służy do generacji impulsów testowych (wstrzykiwanie ładunku),

w trakcie automatycznych pomiarów jest on przestrajany zdalnie. Za pomocą karty pomiarowej National Instruments ustawiany jest próg dyskryminatora oraz kontrolowane są konwertery cyfrowo-analogowe wbudowane w układ scalony. Multimetr umożliwia ręczną zmianę polaryzacji układu scalonego (pomiar prądu polaryzującego). Zestaw wysokiej jakości niskoszumnych zasilaczy laboratoryjnych (zarówno standardowych, jak i wysokonapięciowych) jest bardzo ważny z punktu widzenia uzyskania wiarygodnych wyników szumowych układu. O ile w przypadku tego konkretnego systemu



Rys. 8. Szczegóły obwodu drukowanego

Fig. 8. Details of the printed circuit board

nie było potrzeby zdalnej kontroli napięć zasilających, to jest to możliwe i może służyć do automatycznego wyznaczenia właściwości układu przy różnych napięciach zasilania.

Ponieważ impulsy wyjściowe z układu mogą być bardzo krótkie (dziesiątki nanosekund), standardowa karta pomiarowa nie byłaby w stanie ich zliczyć, ani tym bardziej zmierzyć ich długości z rozsądną dokładnością. W tym celu zastosowano kartę Single-board RIO firmy National Instruments [4], która zawiera układ FPGA (z możliwością programowania z poziomu LabVIEW) oraz procesor DSP. Komunikacja odbywa się poprzez łącze ethernetowe. Karta została zaprogramowana do zliczania impulsów wyjściowych oraz pomiaru ich długości. FPGA jest taktowany zegarem 40 MHz i z taką rozdzielczością dokonywany jest pomiar.

5. Rola oprogramowania

Komputer PC stanowi jednostkę zarządzającą całym systemem do charakteryzacji parametrycznej układu scalonego. Zainstalowane oprogramowanie umożliwia konfigurację systemu, kontrolę sygnałów testowych, akwizycję danych wyjściowych z układu oraz ich interpretację i archiwizację. W aplikacjach testowo-badawczych czas spędzony na przygotowaniu oprogramowania powinien być jak najkrótszy. Środowisko LabVIEW jest powszechnie stosowane w laboratoryjnych systemach pomiarowych [5]. To środowisko graficznego programowania ukierunkowane na aplikacje laboratoryjne jest bardzo uniwersalne, a dzięki wielu opcjonalnym zestawom narzędzi dopasowanym do potrzeb różnych dziedzin, pozwala na błyskawiczne przygotowanie zaawansowanego i wydajnego oprogramowania. Bardzo często pierwsza wersja oprogramowania do testowania układu powstaje w przeciągu kilku dni. Bogate w liczne funkcje biblioteki pozwalają na proste wykonywanie zaawansowanych obliczeń statystycznych, szeroko pojętego przetwarzania sygnałów, eksportu danych pomiarowych do wielu różnych formatów plików, wyświetlania wyników obliczeń na różnego rodzaju wykresach. Ponadto wielu producentów sprzętu laboratoryjnego udostępnia sterowniki pozwalające na kontrolowanie go wprost z poziomu LabVIEW przez typowe interfejsy: GPIB, USB, Ethernet.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono ogólną metodologię charakteryzacji parametrycznej układów do odczytu detektorów promieniowania na przykładzie konkretnego systemu pomiarowego zbudowanego na potrzeby układu TOT01. Przedstawiono również najważniejsze elementy systemu oraz istotne aspekty, m.in.:

- możliwie niskoszumne zasilanie i odpowiednie jego odprężanie, jak również rozsądne prowadzenie linii zasilających i płaszczyzn mas,
- stosowanie takich urządzeń pomiarowych, które umożliwiają zdalną kontrolę z poziomu komputera,
- zapewnienie możliwie dużej uniwersalności obwodu drukowanego, aby jego uruchomienie i testowanie można było realizować w kolejnych etapach, a także znajdować

przyczyny problemów i ewentualnych błędów w działaniu układu,

- troska o sygnały czułe, tj. zapobieganie przenoszeniu się zakłóceń między domenami cyfrowymi i analogowymi, filtrowanie, ekranowanie itp.

Bibliografia

1. Gryboś P.: *Front-end Electronics for Multichannel Semiconductor Detector Systems*. Warsaw University of Technology, 2010.
2. Kasinski K., Szczygiel R., Grybos P.: *TOT01, a time-over-threshold based readout chip in 180 nm CMOS technology for silicon strip detectors*. 2011 JINST **6** C01026.
3. Maj P.: *Zintegrowany wielokanałowy system pomiarowy do detekcji niskoenergetycznego promieniowania X o dużym natężeniu*. Rozprawa Doktorska, Katedra Metrologii, AGH, Kraków 2008.
4. [www.ni.com/singleboard].
5. [www.ni.com/labview]. ■

Test system for the silicon strip detector readout application-specific integrated circuits

Abstract: This paper presents selected methods of testing the application-specific integrated circuits for silicon strip detector readout with the emphasis on the analog parameter's extraction, equipment and software tools used. As an example application the TOT01 ASIC test system (prototype IC for the STS detector at the CBM experiment) has been selected.

Its functionality includes measurement of the energy deposited in the silicon detector as a result of its interaction with a particle or radiation photon. The circuit implements the time-over-threshold method. Its internal structure comprises of charge-sensitive amplifier, discriminator with hysteresis and trimming digital-analog converter.

Proper selection of the measurement equipment, low-noise power supplies and generators together with their remote operation under the supervision of dedicated software is very important. The small size of the ASIC's die ($1.5 \times 3.4 \text{ mm}^2$), the pin-count (81), presence of multiple, mixed-signal power domains, the need to connect the IC to the silicon detector and the system operation in the presence of X-rays impose also very significant requirements for the printed circuit board.

Keywords: measurement system, application-specific integrated circuits, test

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 m.in. projektowanie specjalizowanych układów scalonych oraz systemów kontrolno-pomiarowych.

e-mail: kasinski@agh.edu.pl

