



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

*Mikromocowe, niskopowierzchniowe, wielokanałowe
układy scalone przeznaczone do precyzyjnego pomiaru
energii promieniowania jonizującego*

Autor: mgr inż. Piotr Kaczmarczyk

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Piotr Kmon

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

Kraków, 2023

Streszczenie

Prześwietlenie rentgenowskie oraz tomografia komputerowa stanowią niezaprzeczalnie jeden z fundamentów współczesnej diagnostyki medycznej. Na przestrzeni lat przeszły one wiele modyfikacji, aby móc zaoferować dostępne dziś ogromne możliwości, a co istotne proces ten trwa nadal.

Podstawą współczesnego obrazowania jest pomiar intensywności promieniowania (podobnie jak ma to miejsce w czarno-białej fotografii). Takie podejście stwarza jednak pewne trudności w odróżnieniu niektórych tkanek na zarejestrowanym obrazie, ponieważ materiały różniące się składem chemicznym, ale również gęstością atomów, mogą generować identyczne obrazy. Warty podkreślenia jest jednak fakt, że materiały takie charakteryzują się różnymi współczynnikami tłumienia promieniowania o różnych długościach fal. Są przez to transparentne dla promieni jonizujących o różnych energiach, a rozróżnienie tych energii (podobnie jak w fotografii kolorowej) pozwoliłoby także zidentyfikować poszczególne struktury na wykonanym obrazie. Takie możliwości zapewniają systemy zliczające pojedyncze fotony (ang. *single photon counting*, SPC).

Celem badań, których podsumowaniem jest niniejsza rozprawa, było zaproponowanie nowego sposobu przetwarzania sygnału w kanale odczytowym hybrydowego detektora pikselowego pracującego w trybie SPC, pozwalającego na precyzyjny pomiar energii, zapewniającego jednocześnie wysoką rozdzielczość przestrzenną przy możliwie niskim poborze mocy w submikronowej technologii CMOS 28 nm.

W rozprawie zaprezentowano trzy podejścia do pomiaru energii fotonu w pojedynczym pikselu: wykorzystanie wielu dyskryminatorów (I), zastosowanie dedykowanego przetwornika analogowo cyfrowego (II) oraz użycie asynchronicznej kompensacji zebranego ładunku przy pomocy impulsów prądowych (III). Dwie ostatnie metody zostały przetestowane dzięki zaprojektowanym a następnie wyprodukowanym układom scalonym, a następnie porównane ze sobą pod kątem szybkości pracy, poboru mocy, zajętości powierzchni oraz rozdzielczości pomiaru energii.

Rozprawa doktorska oparta jest o cykl siedmiu publikacji, których doktorant jest jedynym bądź głównym autorem. Ich tematyka dotyczy rozwoju konkretnych rozwiązań układowych dla elektroniki odczytowej hybrydowych detektorów SPC ze szczególnym uwzględnieniem metod pomiaru energii detektowanych cząstek. Rozprawa zawiera także dwa dodatkowe rozdziały. Pierwszy z nich stanowi wstęp do problematyki pomiaru energii fotonów oraz przegląd aktualnego stanu wiedzy w tym obszarze. W drugim rozdziale opisano z kolei kroki badawcze podejmowane przed doktoranta i zawarte w cyklu przedłożonych publikacji. Dodatkowo, wskazano istotne punkty tychże prac, potwierdzające skuteczność zaproponowanych rozwiązań.

Motywacja

W trakcie prześwietlenia rentgenowskiego lub tomografii komputerowej, pacjent umieszczony jest pomiędzy źródłem promieniowania jonizującego a detektorem. Część wyemitowanych promieni ulega absorpcji w napotykanym na swojej drodze przeszkodach, np. kościach i tkankach miękkich, a pozostałe promienie docierają do detektora, generując obraz. Niegdyś jako detektor wykorzystywana była błona fotograficzna (zwana też kliszą rentgenowską). Współcześnie została ona w większości przypadków wyparta przez detektory cyfrowe. Detektor taki składa się z sensora oraz elektroniki odczytowej. Sensor odpowiada za konwersję promieniowania X na sygnał elektryczny, natomiast elektronika za jego przetworzenie i digitalizację w celu dalszej obróbki.

Zdecydowana większość układów odczytowych w stosowanych współcześnie aparatach rentgenowskich i tomografach komputerowych działa w trybie integracyjnym. Ładunki generowane przez rejestrowane fotony są zbierane przez pewien określony czas ekspozycji, a następnie przetwarzana jest informacja o ich sumie. Tracona jest zatem bezpowrotnie informacja o energii oraz czasie wykrycia pojedynczych fotonów. Co więcej, przez cały czas ekspozycji sumowane są również szумы, powodując rozmycie obrazu.

Tych wad pozbawione są układy pracujące w trybie SPC, w których to każdy foton rejestrowany jest oddzielnie, a jego energia porównywana jest z ustalonym progiem dyskryminacji. Takie podejście pozwala znacząco zredukować udział szumu w przetwarzanym sygnale, diametralnie podnosząc jakość generowanych obrazów. Dodatkowo, możliwa jest także redukcja dawki pochłoniętej przez pacjenta przy jednoczesnym zachowaniu wystarczającej jakości obrazu, co jest szczególnie istotne w obliczu nieustannie rosnącej liczby wykonywanych badań z udziałem promieniowania jonizującego.

Kolejną niewątpliwą zaletą systemów SPC jest możliwość rozróżniania fotonów o różnych energiach. Niektóre substancje różniące się składem chemicznym i gęstością atomów mogą wyglądać identycznie na zdjęciu intensywnościowym. Absorbują one jednak fotony o różniących się od siebie energiach. Zjawisko to stanowi podstawę tzw. obrazowania kolorowego, które jest możliwe do realizacji właśnie przy zastosowaniu systemów SPC. Takie podejście znacząco ułatwi odróżnienie na zdjęciu poszczególnych tkanek, a nawet charakteru zmian chorobowych uwidacznianych w trakcie obrazowania, w zdecydowany sposób podnosząc wartość diagnostyczną uzyskiwanych informacji.

Cel pracy i problemy badawcze

Celem badań prowadzonych w ramach doktoratu było zaproponowanie nowego sposobu przetwarzania sygnału w kanale odczytowym hybrydowego detektora pikselowego pracującego w trybie SPC, tak by umożliwić rozróżnianie fotonów o różnych energiach z możliwie wysoką selektywnością. Istotnym aspektem było również uzyskanie wysokiej rozdzielczości przestrzennej, ograniczenie niejednorodności głównych parametrów toru, a także minimalizacja poboru mocy.

Dla osiągnięcia zamierzonego celu zdefiniowano następujące problemy badawcze:

1. Stopień wejściowy dyskryminatora jest zazwyczaj zbudowany ze wzmacniacza różnicowego, działającego w otwartej pętli z wysokim, ale skończonym wzmocnieniem i dodatkowo wspieranym dodatnim sprzężeniem zwrotnym. Wzmacniana różnica napięć wejściowych bywa stosunkowo niska, a całkowity czas reakcji dyskryminatora wydłuża się dla sygnałów nieznacznie tylko przekraczających próg dyskryminacji. W przypadku obrazowania monoenergetycznego próg dyskryminacji ustawia się pomiędzy poziomem szumu a oczekiwaną energią rejestrowanych fotonów. Ze względu na zjawisko podziału ładunku (szczególnie nasilone w detektorach o małym rozmiarze piksela), nie wszystkie ładunki generowane przez foton są deponowane w jednym pikselu. Zamiast tego „przeciekają” one do sąsiednich pikseli, generując sygnały odpowiadające proporcjonalnie niższej energii. Aby prawidłowo je wykryć, próg dyskryminacji musi zostać obniżony w kierunku poziomu szumów. Tym samym poprawa zdolności dyskryminatora do szybkiego wykrywania najmniejszych możliwych ładunków (tuż powyżej progu) może w pewnym stopniu usprawnić detekcję przy jednoczesnym zachowaniu dostatecznego marginesu pomiędzy progiem dyskryminacji a poziomem szumów.
2. Komparator jest najprostszym przetwornikiem analogowo-cyfrowym i stanowi wspólny element składowy bardziej złożonych przetworników A/C. Jako podstawowy komponent przetwornika z bezpośrednim porównaniem (ang. *flash*), jest on powielany dziesiątki razy w pojedynczym układzie. Jest on również jednym z najbardziej energochłonnych komponentów przetwornika z kompensacją wagową (ang. *successive-approximation-register*, SAR). Zmiana trybu pracy komparatora z ciągłego na dyskretny (dynamiczny) zapewnia znaczącą redukcję poboru mocy. Zmniejszenie rozmiaru tranzystorów, z których zbudowany jest komparator, przyspiesza jego działanie, ograniczając pasożytnicze pojemności. Wpływa to pozytywnie na zajmowaną powierzchnię, ale jednocześnie degradowuje jednorodność wytwarzanych mikrostruktur, wprowadzając napięcie niezrównoważenia. Główne parametry układu są ze sobą powiązane często skomplikowanymi nieliniowymi zależnościami i muszą zostać zoptymalizowane w procesie projektowania, w zależności od specyfikacji. Dobór punktu początkowego takiej optymalizacji nie jest jednak oczywisty.
3. Powszechna metoda kompensacji napięcia niezrównoważenia komparatora dynamicznego polega na dołączaniu kondensatorów kalibracyjnych, które jednak spowalniają rozładowanie węzła komparatora, degradowując szybkość pracy układu. Przedstawiona w literaturze przedmiotu metoda kompensacji w dziedzinie czasu w przetworniku typu *flash* nie pogarsza szybkości komparatora, jednak kontrola opóźnień buforów zegara jest osiągnięta za pomocą matrycy kondensatorów, które zajmują stosunkowo dużo miejsca.

4. Stopień wejściowy kanału odczytowego detektora musi być zoptymalizowany pod względem wzmocnienia, szybkości, szumów, zużycia energii, zajmowanej powierzchni i poziomu napięcia stałego. Co istotne, wymagania te bardzo często są odmienne dla różnych projektów. Kaskodowany inwerter jest bardzo obiecującą architekturą rdzenia wzmacniacza ładunkowego, gdyż może zapewnić wysokie wzmocnienie przy niskim poborze mocy i niskiej zajętości powierzchni krzemu. Wyzwaniem jest jednak ustalenie właściwego rozmiaru tranzystorów i napięć polaryzujących. Obliczenia ręczne oparte na modelach są niedokładne (szczególnie w przypadku technologii nanometrycznych), a iteracyjne projektowanie w oparciu o tradycyjne symulacje analogowe jest czasochłonne i nie zawsze pozwala na dobre zrozumienie występujących zależności.
5. Z wyjątkiem nielicznych prac, w których nie określono użytego procesu technologicznego, wszystkie rozwiązania opisane w przeglądzie aktualnego stanu wiedzy opierają się na starszych, choć dojrzałych, węzłach technologicznych, tj. 40 nm i wyższych. W związku z tym, w odniesieniu do nowszych procesów, te same bloki funkcjonalne zajmują większą powierzchnię, ograniczają rozdzielczość przestrzenną, a także działają wolniej (ograniczając dopuszczalną intensywność rejestrowanego promieniowania). Jednak sama migracja do nowszej technologii nie jest rozwiązaniem oczywistym - zwłaszcza, że nowsze procesy wytwarzania układów scalonych nastawione są przede wszystkim na układy cyfrowe, a parametry układów analogowych ulegają stopniowemu pogorszeniu. Potrzebne są zatem nowe metody przetwarzania rejestrowanych sygnałów pochodzących z sensorów promieniowania jonizującego, co potwierdzają liczne prace ośrodków badawczych oraz firm o zasięgu światowym. Celem tychże badań jest przewyciężenie wad detektorów SPC w stosunku do detektorów integracyjnych, które mimo swoich niedoskonałości (wyższe szумы, brak informacji o czasie detekcji i energii fotonu) umożliwiają szybkie przetwarzanie sygnału. Detektory SPC powinny charakteryzować się również niewielkimi rozmiarami i niskim poborem mocy.

Najważniejsze wyniki

W rozprawie doktorskiej przedstawiono dostępne obecnie metody pomiaru energii fotonów promieniowania jonizującego w układach elektroniki odczytowej. Omówiono ich wady i zalety, a następnie zaproponowano trzy rozwiązania układowe mające na celu uzyskanie zarówno wyższej selektywności energetycznej jak i zdolności do pracy z większym natężeniem promieniowania, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej rozdzielczości przestrzennej i niskiego poboru mocy.

Wszystkie opisane w przedłożonych publikacjach prace zostały zrealizowane w technologii CMOS 28 nm. Jest to technologia o generację nowsza od prezentowanych w literaturze (40 nm), a o dwie generacje od dostępnych komercyjnie rozwiązań (np. Timepix4 w 65 nm).

Technologia ta pozwala na jeszcze gęstsze upakowanie tranzystorów, co daje możliwość zwiększenia funkcjonalności pojedynczego piksela.

Podczas rozwiązywania zaprezentowanych wcześniej problemów badawczych uzyskano następujące wyniki:

1. Zaprojektowano niskoenergetyczny dyskryminator pracujący w trybie ciągłym, znacząco redukując niepożądaną zależność pomiędzy opóźnieniem reakcji a różnicą między napięciami wejściowymi dzięki zastosowaniu konwertera ujemnej impedancji. Rozwiązanie to pozwala na wykrywanie impulsów wyjściowych wzmacniacza ładunkowego (ang. *charge-sensitive amplifier*, CSA) przekraczających próg dyskryminacji z niemal jednakową szybkością, niezależnie od amplitudy impulsu. Poprawia to szybkość zliczania detektora i skuteczność wykrywania małych porcji energii (np. wynikających z efektu podziału ładunku). Według najlepszej wiedzy autora jest to pierwsze zastosowanie konwertera ujemnej impedancji w dyskryminatorze.
2. Przygotowano kompleksowe studium projektowe dwustopniowego komparatora dynamicznego z zatraskiem w 28 nm CMOS. Może ono pomóc innym projektantom w doborze odpowiedniego punktu pracy i wskazać kierunki optymalizacji, biorąc pod uwagę wymagane parametry (np. zajętość obszaru, pobór mocy, szybkość pracy, poziom szumów, dopuszczalne napięcie niezrównoważenia itp.).
3. Zaproponowano nowy sposób sterowania układem kompensacji napięcia niezrównoważenia komparatora dynamicznego w dziedzinie czasu poprzez regulację napięcia bufora opóźniającego sygnały kontrolne. Komparator z układem kompensacji zaimplementowano w 8-bitowym różnicowym przetworniku SAR, który został wyprodukowany w technologii CMOS 28 nm. Przeprowadzone pomiary dowiodły skuteczności opracowanej metody.
4. W oparciu o metodę gm/ID i algorytm optymalizacji rojem cząstek (ang. *particle swarm optimization*, PSO) opracowano narzędzie do optymalizacji projektu CSA opartego na kaskodowanym inwerterze. Narzędzie dostarcza projektantowi wymagane wymiary tranzystorów i napięcia polaryzacji gwarantujące spełnienie wymagań określonych w specyfikacji. Metoda gm/ID zapewnia bardziej wiarygodne wyniki niż tradycyjne modele, gdyż opiera się na danych uzyskanych z symulacji DC tranzystorów w konkretnej technologii. Połączenie tej metody z numerycznymi narzędziami obliczeniowymi zapewnia optymalny dobór pożądanych parametrów, biorąc pod uwagę konkretne wymagania. Do algorytmu optymalizacyjnego dostarczono dane wyekstrahowane z symulacji tranzystorów w technologii CMOS 28 nm firmy Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC). Występujące w układzie zależności opisano odpowiednimi wzorami, zdefiniowano tzw. funkcję kosztu pozwalającą ocenić zbieżność otrzymanych wyników z oczekiwanymi oraz określono warunek zatrzymania algorytmu optymalizacji. Otrzymane wyniki zostały zweryfikowane za pomocą

symulacji analogowych. Tak zaprojektowany wzmacniacz został następnie zaimplementowany w 100-kanalowym układzie scalonym, którego testy wykazały poprawne działanie i potwierdziły skuteczność metody.

5. Zweryfikowano zdolność pomiaru energii w pikselu detektora zaprojektowanego w technologii TSMC 28 nm za pomocą podejścia opartego na wielu dyskryminatorach oraz za pomocą 8-bitowego różnicowego przetwornika SAR. Finalnie opracowano nowy obwód oparty na asynchronicznym generatorze impulsów prądowych. Jego główną zaletą jest jednoczesna konwersja amplitudy sygnału wyjściowego CSA na słowo cyfrowe i rozładowanie kondensatora w sprzężeniu zwrotnym. Zaprojektowany układ łączy zatem w sobie przetwornik A/C i obwód resetowania, redukując zajmowaną powierzchnię. Dzięki małemu krokowi rozładowania kondensatora, rozdzielczość pomiaru energii jest wysoka, a powrót do poziomu bazowego wyjścia CSA szybki w szerokim zakresie energii (w porównaniu do resetu kluczem lub układem *click-clack*). Dzięki asynchronicznej architekturze wyeliminowana została konieczność doprowadzenia sygnału zegara, znacząco redukując zapotrzebowanie energetyczne i powierzchniowe układu. Cyklicznie przełączany sygnał zegara odpowiada bowiem za istotną część poboru mocy wielu układów synchronicznych, a poprawne doprowadzenie go do wszystkich elementów układu scalonego bywa wymagające. Ponadto, szybkozmienny sygnał cyfrowy, obecny w całym układzie podczas działania wrażliwych obwodów analogowych, mógłby zakłócać ich działanie. Opracowany obwód działa również ze znacznie wyższą częstotliwością (kilka GHz, w porównaniu do dziesiątek MHz raportowanych we współczesnych pracach), dlatego przywrócenie poziomu bazowego CSA jest krótsze, co pozytywnie wpływa na osiąganą szybkość zliczania impulsów.

Według najlepszej wiedzy autora, jest to pierwsze rozwiązanie układowe oparte na asynchronicznym generatorze impulsów prądowych, w którym kondensator sprzężenia zwrotnego CSA jest rozładowywany dopiero po zebraniu całego ładunku (bez negatywnego wpływu na proces zbierania ładunku) i działające z prędkością rzędu GHz. Jest to również jeden z niewielu tego typu projektów zrealizowanych w technologii 28 nm.

Autorski obwód został zweryfikowany w wielokanałowym specjalizowanym układzie scalonym REMIC (ang. *radiation energy measuring integrated circuit*). Ostatecznorozwiązanie składa się ze zoptymalizowanego wzmacniacza ładunkowego opartego na kaskodowanym inwerterze, asynchronicznego obwodu rozładowania i konwersji, dynamicznego komparatora z kompensacją offsetu w dziedzinie czasu oraz dyskryminatora pracującego w trybie ciągłym, łącząc wszystkie prace wykonane w trakcie doktoratu.

Podsumowanie

W ramach realizowanych prac badawczych zaprojektowano i przetestowano dwa autorskie układy scalone. Wyznaczone parametry wyprodukowanych mikrostruktur krzemowych dowodzą, że autor rozprawy zrealizował cel pracy, jakim było zaproponowanie nowego sposobu przetwarzania sygnału w kanale odczytowym hybrydowego detektora pikselowego pracującego w trybie SPC, tak by umożliwić rozróżnianie fotonów o różnych energiach z możliwie wysoką selektywnością. Zadbano również o wysoką rozdzielczość przestrzenną, ograniczenie niejednorodności głównych parametrów, możliwość pracy z dużą intensywnością promieniowania i niski pobór mocy.

Różnicowy 8-bitowy przetwornik SAR ze względu na swój rozmiar ($30\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$) może zostać zaimplementowany w pojedynczym pikselu układu o wysokiej rozdzielczości przestrzennej (rzędu $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$) a jego częstotliwość przetwarzania (9.1MS/s) oraz pobierana moc na poziomie $45\ \mu\text{W}$ pozwalają na pracę z promieniowaniem używanym w badaniach tomografii komputerowej.

Drugi układ scalony – REMIC – zapewnia bardzo wysoką rozdzielczość przestrzenną dzięki pikselom o wymiarach $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ zorganizowanych w matrycę 10×10 . Rozróżnianie fotonów o różnej energii zapewnia autorski asynchroniczny układ kompensacji zgromadzonego ładunku przy pomocy impulsów prądowych zliczanych przez 12-bitowy licznik. Regulacja prądu rozładowania pozwala konfigurować układ w stronę wyższej szybkości pracy lub wyższej rozdzielczości pomiaru. Całkowity pobór mocy w pojedynczym pikselu wynosi poniżej $17\ \mu\text{W}$.

Uzyskane parametry prototypowego układu scalonego REMIC świadczą, że zaimplementowana autorska metoda pomiaru energii może znaleźć zastosowanie w detektorach wieloenergetycznych tomografów komputerowych, zapewniając rozróżnianie fotonów z nieosiągalną dotąd selektywnością. Otwiera to pole do dalszych badań zmierzających do opracowania pełnowymiarowego układu scalonego oraz dalszej optymalizacji systemu pod kątem zastosowania go w rzeczywistym środowisku.

W celu minimalizacji efektów niedopasowania, w obydwu układach scalonych zaimplementowano obwody kalibrujące, w tym układ kompensacji napięcia niezrównoważenia komparatora w dziedzinie czasu.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć autora należy zaliczyć:

- Znaczącą minimalizację niepożądanego czasu reakcji dyskryminatora pracującego w trybie ciągłym od wejściowego napięcia różnicowego poprzez zastosowanie układu ujemnej pojemności.
- Wyznaczenie zależności głównych parametrów dwustopniowego komparatora dynamicznego od wymiarowania i skalowania poszczególnych tranzystorów oraz przygo-

towanie opracowania pozwalającego na szybkie oszacowanie wymiarów tranzystorów w zależności od oczekiwanych kryteriów optymalizacji projektowanego układu.

- Opracowanie i weryfikację nowej metody kontroli układu kompensacji napięcia niezrównoważenia komparatora dynamicznego w dziedzinie czasu przy pomocy regulowanej napięciem linii opóźniającej.
- Wyznaczenie zależności głównych parametrów wzmacniacza ładunkowego zbudowanego w oparciu o układ kaskodowanego inwertera oraz opracowanie narzędzi do przeprowadzania numerycznej optymalizacji wymiarów i napięć polaryzacji rdzenia w celu osiągnięcia zadanych parametrów.
- Zaprojektowanie i weryfikację, w wytworzonych mikrostrukturach krzemowych, nowej metody pomiaru energii fotonów promieniowania jonizującego za pomocą asynchronicznego układu rozładowującego kondensator w sprzężeniu zwrotnym wzmacniacza ładunkowego impulsowo wyzwalanym źródłem prądowym.