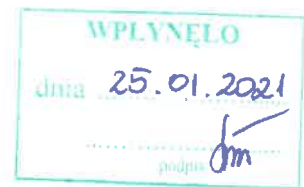


Warszawa, 15 stycznia 2021 r.

Dr hab. inż. Witold Pleskacz, prof. uczelni  
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki  
Politechnika Warszawska



**OPINIA O ROZPRAWIE DOKTORSKIEJ  
DLA RADY NAUKOWEJ DYSCYPLINY AUTOMATYKA,  
ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA  
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**Dissertation title: Low Noise Integrated Circuits for Radiation Imaging with High-Speed Digital Interface (oryginalny tytuł rozprawy w jęz. angielskim)**

**Tytuł rozprawy: Niskoszumowe scalone układy z szybkim interfejsem cyfrowym do obrazowania promieniowania (tłumaczenie z jęz. angielskiego)**

**Autor rozprawy: mgr inż. WERONIKA ZUBRZYCKA**

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Podjęte w rozprawie doktorskiej zagadnienia naukowe dotyczą poszukiwań i badań nowych rozwiązań konstrukcyjnych zintegrowanych niskoszumowych układów odczytowych (tzw. elektroniki odczytu – ang. *Front-End Electronics*) przeznaczonych do pracy w systemach wielokanałowych. Układy te mają współpracować z półprzewodnikowymi detektorami paskowymi i mają służyć do obrazowania promieniowania rentgenowskiego lub w detektorach śladowych stosowanych w eksperymentach fizyki wysokich energii HEP (ang. *High Energy Physics*). W związku z prowadzonymi badaniami w ramach eksperymentu ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*) w szwajcarskim centrum badawczym CERN, czy w ramach programu CBM (*Compressed Baryonic Matter*) w niemieckim ośrodku GSI-FAIR (*Facility for Antiproton and Ion Research*) pojawiło się zapotrzebowanie na zwiększenie precyzji pomiaru wielkości ładunku wygenerowanego w półprzewodnikowym detektorze promieniowania i dokładności czasu wystąpienia zdarzenia, a także szybkości przetwarzania tych impulsów. Można to osiągnąć dokonując redukcji szumów elektroniki odczytu oraz zwiększając przepustowość łączy danych tych układów oraz stosując układy do szybkiego przywracania

Wsk

stanu pierwotnego. Spełnienie powyższych wymagań, stawianych nowym systemom detekcyjnym, spowodowało potrzebę opracowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych dla części analogowej i cyfrowej – służących do odczytu danych z detektorów półprzewodnikowych. Aby to osiągnąć w tym celu należałoby:

- przeprowadzić optymalizację konstrukcji układów pod kątem minimalizacji szumów, poboru mocy i spełnienia wymogów przetwarzania danych z dużą szybkością;
- opracować szybki cyfrowy interfejs komunikacyjny, pracujący z dużą częstotliwością, o dużej przepustowości magistrali, a także o dużej odporności na efekty radiacyjne.

Przy powyższych założeniach Doktorantka postawiła następujące cztery rozbudowane tezy dysertacji (tłumaczenie polskie i wersje oryginalne w jęz. angielskim):

1. Różnicowe przetwarzanie ładunku może być efektywne w niskoszumowych systemach odczytowych, z wysokimi wymaganiami środowiskowymi i na zajmowaną powierzchnię. Różnicowe przetwarzanie ładunku w elektronice odczytu dla detektorów jest rzadko wykorzystywane, ze względu na wyższą moc rozpraszaną, większą zajmowaną powierzchnię oraz wyższe szумы własne. Jednak, założenie takie jest prawdziwe tylko w przypadku, kiedy jest możliwe dostarczenie niezakłóconego (tj. o niskim poziomie szumów i zakłóceń) napięcia zasilania. Istnieją zastosowania, w których użycie architektury różnicowego lub pseudo-różnicowego przetwarzania ładunku może być korzystne. Wśród tych zastosowań znajdują się m.in. detektory śladowe, gdzie sprzężenie zakłóceń indukowanych przez zasilacz nie jest pomijalne, nie jest możliwe zastosowanie filtrów, ze względu na duże pola magnetyczne i ma znaczący wpływ na pracę elektroniki odczytu. Oczekiwana dawka promieniowania i wysokie pole magnetyczne uniemożliwiają stosowanie dostępnych w handlu przetworników DC-DC o niskim poziomie szumów, liniowych regulatorów napięcia i cewek ferrytowych.

#### *Thesis 1*

*Differential charge processing can be efficient in low-noise systems with tight area and environmental constraints. Differential charge processing in the read-out electronics for detectors is rarely used due to higher power dissipation, larger area occupancy and intrinsically higher noise. However, this assumption is true only if the clean supply voltage can be provided. There are applications where use of differential or pseudo-differential charge processing architectures may become beneficial. These applications include tracking detection stations where the power supply induced interference coupling is not negligible, cannot be externally filtered due to magnetic field and influences the electronics performance significantly. The expected radiation dose and high magnetic field prevents the use of the commercial off-the-shelf low noise DC-DC converters, linear voltage regulators and ferrite-based inductors.*

Wsk

2. Istnieje możliwość poprawy parametrów szumowych w niekorzystnych i zmiennych warunkach środowiskowych ze zmieniającymi się dominującymi składowymi źródłami szumów dzięki zastosowaniu dogłębnej analizy i symulacji wzdłużnej i poprzecznej architektury detektora i przewodu łączącego z elektroniką odczytu oraz przez zastosowanie konfigurowalnej architektury elektroniki odczytu, szczególnie w filtrach kształtujących, aby lepiej dostosować pracę układu do zewnętrznych warunków.

#### *Thesis 2*

*It is possible to improve the noise performance in the harsh and variable environment with varying and complex dominant noise sources contribution by in-depth analysis and simulation of the longitudinal and transverse architecture of the detector and connection to the read-out electronics and by employing configurability in the read-out electronics, especially in the shaping filters to adapt and a better match to the external conditions.*

3. Stabilna praca wzmacniacza ładunkowego (CSA, ang. *Charge Sensitive Amplifier*) z dużą rezystancją w sprzężeniu zwrotnym z zapewnieniem szybkiego przetwarzania ładunków wejściowych w obecności bardzo dużego prądu upływu o nieznanym lub zmiennym natężeniu oraz kierunku, może być osiągnięta przez kombinację wspomaganego cyfrowo obwodu resetu z technikami kompensacji prądu upływu.

#### *Thesis 3*

*Stable operation of the Charge Sensitive Amplifier (CSA) with high feedback resistance while providing fast input charges processing in the presence of extensive leakage current of unknown and variable amount and flowing direction, can be obtained by the combination of digitally-assisted fast reset with the leakage current compensation techniques.*

4. Wykorzystanie nowszych technologii w projekcie obwodów transmisji danych jest korzystne nie tylko pod względem przyśpieszenia częstotliwości pracy i szybkości transmisji danych, co jest pożądane w złożonych systemach odczytowych, w których generowana jest ogromna ilość danych, ale może również zmniejszyć wrażliwość układu na efekty radiacyjne (całkowitą dawkę napromieniowania) oraz umożliwić zastosowanie wydajnych technik minimalizowania skutków pojedynczych zdarzeń (ang. *Single Event Effects*) bez istotnego pogorszenia zajmowanej powierzchni i możliwej do osiągnięcia szybkości pracy.

#### *Thesis 4*

*Using newer technologies in the design of data transmitting circuitry is beneficial not only in terms of speeding up the operation and data transmission, which is required in the complex read-out systems generating huge amount of data but also can decrease the sensitivity of the circuit to the radiation related effects (Total Irradiation Dose) and*

*Wskm*

*enable employing acceptably effective Single Event Effects mitigation techniques without compromising the available area and possible operation speed.*

Zarówno założenia jak i cel pracy zostały jasno sformułowane przez Autorkę. Rozprawa ma charakter konstrukcyjno-doświadczalny. Główne przeprowadzone eksperymenty polegały na:

- poszukiwaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych układów odczytowych,
- symulacjach komputerowych schematów elektrycznych (z uwzględnieniem rozrzutów parametrów procesu technologicznego),
- zaprojektowaniu topografii masek produkcyjnych (z uwzględnieniem istniejących elementów pasożytniczych),
- przeprowadzeniu pomiarów wyprodukowanych prototypów układów scalonych i wyciągnięciu właściwych wniosków.

**2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

W pracy przeprowadzono prawidłową analizę źródeł oraz przedstawiono dotychczasowe rozwiązania literaturowe i powszechnie stosowane w przemyśle mikroelektronicznym. Omówiono ich ograniczenia, zalety i wady oraz wyciągnięto odpowiednie wnioski. Wykaz cytowanych źródeł obejmuje 131 publikacji drukowanych i internetowych, takich jak: książki, czasopisma, materiały konferencyjne, podręczniki, opracowania przeglądowe, prywatne informacje pochodzące od innych naukowców, informatory o eksperymentach naukowych i specyfikacje techniczne. Wśród tych pozycji 12 publikacji jest współautorstwa Doktorantki. (Są to pozycje ze spisu literatury o następujących numerach: 30, 51, 52, 60, 66, 75, 80, 102, 118, 128, 129, 131. Publikacja 102 została powtórzona w pozycji 130.) Przeprowadzona analiza źródeł świadczy o bardzo dobrej znajomości zagadnień dotyczących półprzewodnikowych detektorów promieniowania i elektroniki odczytowej oraz o kompetencjach Autorki w zakresie projektowania specjalizowanych układów scalonych wielkiej skali integracji typu ASIC realizowanych w nowoczesnych technologiach submikrometrowych i nanometrowych CMOS.

**3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Cel pracy polegający na zaprojektowaniu, wykonaniu i przeprowadzeniu pomiarów nowych rozwiązań konstrukcyjnych zintegrowanych niskoszumowych układów odczytowych (elektroniki odczytu), z przeznaczeniem do zastosowań w wielokanałowych systemach pomiarowych, został zrealizowany. Można tutaj wyróżnić trzy odrębne autorskie opracowania

WSM



specjalizowanych układów scalonych typu ASIC (ang. *Application Specific Integrated Circuit*):

1. Projekt wielokanałowego układu scalonego SMX\_mini do odczytu paskowych detektorów krzemowych i przetwarzania sygnału z detektora poprzez odpowiednie ukształtowanie impulsu i odfiltrowanie szumu. Zastosowano w nim 8 kanałów odczytowych, z czego 4 kanały są asymetryczne (ang. *single-ended*) a 4 są różnicowe (ang. *differential*). Zarówno kanały asymetryczne, jak i różnicowe zawierają wzmacniacz ładunkowy CSA (ang. *Charge Sensitive Amplifier*) oraz filtr kształtujący o przełączanej architekturze. Układ został zaprojektowany na podstawie wymagań eksperymentu CBM (*Compressed Baryonic Matter*) dla krzemowych czujników paskowych w detektorze STS (ang. *Silicon Tracking System*). Zaproponowana konstrukcja układu scalonego SMX\_mini była podyktowana potrzebą wykazania słuszności:
  - Tezy 1 w celu potwierdzenia efektywności różnicowego przetwarzania ładunku.
  - Tezy 2 w zakresie konfigurowalnych parametrów filtrów kształtujących, dobranych na podstawie dogłębnej analizy szumowej z wykorzystaniem modeli czujników, specjalizowanych przewodów połączeniowych oraz dodatkowych elementów systemu.
  - Tezy 3 dotyczącą zapewnienia stabilnej pracy wzmacniacza ładunkowego CSA i możliwości szybkiego przetwarzania ładunków, mimo występowania dużego prądu upływu w systemie.
2. Projekt wielokanałowego układu scalonego PRINCSA (all-Programmable Read-out with Improved Noise-performance Charge Sensitive Amplifier) przeznaczonego do współpracy z krzemowymi dwustronnymi detektorami paskowymi, które są wykorzystywane w eksperymencie CBM. Zaprojektowany układ zawiera łącznie 6 kanałów odczytowych (w tym 3 asymetryczne i 3 różnicowe), układ kalibracyjny oraz źródła napięć i prądów odniesienia. Głównym zagadnieniem badawczym wziętym pod uwagę podczas projektowania układu PRINCSA było dokonanie porównania poprawy wyjściowego poziomu szumów, wyrażonego jako równoważny ładunek szumu ENC (ang. *Equivalent Noise Charge*) oraz kosztów związanych z rozpraszaną mocą i powierzchnią zajmowaną przez kanał odczytowy. Na podstawie pomiarów wyprodukowanego układu scalonego zaobserwowano prawie dwukrotnie niższe szумы dla kanałów różnicowych w przypadku zastosowania szumiącego zasilania, co jest potwierdzeniem słuszności postawionej tezy 1 rozprawy doktorskiej. Natomiast zastosowanie w układzie konfigurowalnej architektury filtrów kształtujących oraz podwójnego układu Krummenachera w kanałach asymetrycznych podyktowane było również wykazaniem słuszności tez 2 i 3.
3. Projekt układu pętli synchronizacji fazy PLL (ang. *Phase-Locked Loop*) do zastosowań w systemach szybkiej transmisji danych na potrzeby eksperymentów fizyki wysokich energii. Celem projektu było symulacyjne zweryfikowanie możliwości zastosowania nanometrowej technologii CMOS, nowocześniejszej niż dotychczas powszechnie stosowane technologie do produkcji układów scalonych tego typu, a przeznaczonych do pracy w obecności promieniowania jonizującego oraz

WSku

narażonych na uszkodzenia związane z całkowitą pochłoniętą dawką jonizującą TID (ang. *Total Ionizing Dose*) i z efektami pochodzącymi od pojedynczych zdarzeń SEE (ang. *Single Event Effects*). Układ PLL został opracowany w związku z postawioną 4 tezą rozprawy doktorskiej.

Realizację celu pracy Autorka osiągnęła w sposób następujący:

1. Zaproponowała nowe rozwiązania konstrukcyjne wielokanałowych układów odczytowych i pętli synchronizacji fazy, w których położono nacisk na niski poziom szumów i szybkość pracy. Brano pod uwagę prądy upływu, pobór mocy oraz powierzchnię.
2. Wykonała symulacje komputerowe schematów elektrycznych opracowanych układów.
3. Zaprojektowała topografie masek produkcyjnych układów scalonych z uwzględnieniem elementów pasożytniczych.
4. W przypadku układów odczytowych SMX\_mini i PRINCSA dokonała pomiarów wyprodukowanych prototypów układów scalonych. Wyniki pomiarów pokazały słuszność przyjętej koncepcji rozwiązań konstrukcyjnych oraz poprawność metody projektowania.
5. W przypadku pętli synchronizacji fazy PLL działanie układu zostało sprawdzone symulacyjnie pod kątem działania w sytuacji zajścia zdarzeń typu SEE w najbardziej wrażliwych jego węzłach. Po wyprodukowaniu praca układu zostanie zmierzona w warunkach wystąpienia rzeczywistego promieniowania.

**4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

Samodzielnym i oryginalnym dorobkiem Autorki są nowe rozwiązania konstrukcyjne zintegrowanych niskoszumowych układów odczytowych (elektroniki odczytu), z przeznaczeniem do zastosowań w wielokanałowych systemach pomiarowych współpracujących z krzemowymi detektorami paskowymi. Podczas procesu projektowania położono szczególny nacisk na niski poziom szumów i szybkość pracy układów.

Pierwsze rozwiązanie to wielokanałowy prototypowy układ scalony, który został zaprojektowany i wyprodukowany w technologii UMC CMOS 180 nm. Zastosowano w nim filtr kształtujący (ang. *shaping amplifier*), który dzięki specjalnej konfiguracji elementów pasywnych oraz odpowiednim umiejscowieniu kluczy, może pracować jako semi-Gaussowski filtr CR-RC<sup>2</sup> lub filtr ze sprzężonymi zespolonymi biegunami trzeciego rzędu, o stałym czasie kształtowania wynoszącym 90 ns. W asymetrycznych kanałach odczytowych sprzężenie zwrotne wzmacniacza ładunkowego, oprócz tranzystora MOS pracującego w zakresie liniowym, zawiera układ kompensacji prądu upływu (podwójny, przełączany układ Krummenachera) oraz szybki reset wspomagany cyfrowo. Dodatkowo, aby była możliwa praca z ładunkami wejściowymi w postaci dziur lub elektronów, w asymetrycznych kanałach zastosowano układ wyboru polarności.

Wsk

Drugie rozwiązanie to również prototypowy wielokanałowy układ scalony wyprodukowany w technologii UMC CMOS 180 nm. W układzie tym każdy kanał stanowi tor przetwarzania ładunku i zawiera wzmacniacz ładunkowy CSA, „szybką” ścieżkę z filtrem kształtującym typu CR-RC o czasie kształtowania 40 ns, „wolną” ścieżkę z przełączalnym filtrem kształtującym: semi-Gaussowskim CR-RC<sup>2</sup> oraz ze sprzężonymi zespolonymi biegunami trzeciego rzędu. W kanałach asymetrycznych „wolny” filtr kształtujący ma możliwość pracy z jednym z trzech czasów kształtowania – 90 ns, 180 ns lub 250 ns. Natomiast w kanałach różnicowych czas kształtowania filtra wynosi 90 ns.

Trzecie rozwiązanie to prototypowy scalony układ pętli synchronizacji fazy zaprojektowany w technologii TSMC CMOS 28 nm. W układzie tym zastosowano wybrane techniki uodparniania na efekty radiacyjne jego składowych bloków, takich jak detektor fazy/częstotliwości, dzielnik częstotliwości, pompa ładunkowa, oscylator sterowany napięciem. Docelowa częstotliwość pracy oscylatora to 3,2 GHz. Osiągnięcie tego parametru zostało potwierdzone symulacjami komputerowymi na poziomie schematu elektrycznego, bez elementów pasożytniczych, oraz schematu elektrycznego po ekstrakcji z topografii masek z uwzględnieniem elementów pasożytniczych.

Recenzowana praca stanowi samodzielne i oryginalne w skali światowej rozwiązanie zagadnień postawionych przez Doktorantkę. Wyniki prowadzonych badań były przedstawione w wielu komunikatach i artykułach naukowych (o cyrkulacji międzynarodowej) oraz były prezentowane na konferencjach międzynarodowych. Należy wyraźnie zaznaczyć, że spośród kilkunastu artykułów naukowych Doktorantki, pięć zostało opublikowanych w czasopiśmie znajdujących się na liście JCR (ang. *Journal Citation Reports*). Do najważniejszych publikacji naukowych związanych bezpośrednio z tematyką dysertacji można zaliczyć następujące artykuły:

1. **Weronika ZUBRZYCKA**, Krzysztof KASIŃSKI, “All-programmable low noise readout ASIC for silicon strip sensors in tracking detectors”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, 988, 164892, IF: 1.142. (Lista MNiSW A 2020 – 70 pkt.) <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164892>
2. **Weronika ZUBRZYCKA**, Krzysztof KASIŃSKI, “Prototype single-ended and pseudo-differential charge processing circuit for micro-strip silicon and gaseous sensors read-out”, **Journal of Instrumentation** 2019, vol. 14 art. no. C11030, IF: 1.366. (Lista MNiSW A 2019 – 70 pkt.) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/11/C11030>
3. **Weronika ZUBRZYCKA**, Krzysztof KASIŃSKI, “Leakage current-induced effects in the silicon microstrip and gas electron multiplier readout chain and their compensation method”, **Journal of Instrumentation** 2018 vol. 13 art. no. T04003, IF: 1.366. (Lista MNiSW A 2018 – 35 pkt.) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/04/T04003>

WStk

**5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?**

Rozprawa została napisana w języku angielskim. Prawdopodobne było to podyktowane chęcią Doktorantki i jej Promotora rozpowszechniania uzyskanych wyników badań na arenie międzynarodowej, co jest sprawą zrozumiałą i pozytywną. Takie postępowanie nabiera szczególnego znaczenia, gdy katedra, w której zrealizowany został doktorat, współpracuje z zagranicznymi ośrodkami badawczymi przeprowadzającymi eksperymenty fizyki wysokich energii.

Praca jest poprawna pod względem językowym i redakcyjnym, odpowiada wymaganiom stawianym publikacjom naukowo-technicznym. Użyta terminologia jest prawidłowa. Praca została napisana starannie, w jasnym układzie logicznym. Cele pracy przedstawiono precyzyjnie i konsekwentnie je zrealizowano. Autorskie koncepcje nowych rozwiązań układowych zostały przedstawione w sposób komunikatywny. Doktorantka prawidłowo sformułowała założenia, cele pracy oraz wnioski końcowe.

**6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?**

Recenzent nie dostrzega wad rozprawy w jej zakresie merytorycznym, w części projektowej i doświadczalnej. Słabych stron jest niewiele i nie mają istotnego wpływu na wartość naukową rozprawy. Pewien niedosyt budzi niedostatecznie szerokie omówienie wagi podjętych zagadnień naukowych dotyczących minimalizacji wpływu prądów upływu na wejściu elektroniki odczytu, czy zwiększaniu odporności na efekty radiacyjne układów syntezy częstotliwości, które z pewnością nie należą do gatunku prostych i łatwych do rozwiązania. Jej szersze i głębsze omówienie zdecydowanie bardziej by uwypukliło znaczenie osiągniętych wyników. W związku z tym nasuwają się następujące pytania. Czy istnieją inne techniki kompensacji prądów upływu niż te zaprezentowane w pracy? A jeśli tak, jak wypadają one na tle rozwiązań zastosowanych w pracy? Czy w wielokanałowym układzie odczytu prądu upływu poszczególnych kanałów są zbliżone co do wartości? A jeśli tak, czy wykorzystanie tego faktu pozwoliłoby na zmniejszenie powierzchni i poboru prądu układów kompensacji? W pracy postawiono tezę, że wpływ efektów radiacyjnych można zredukować poprzez wykorzystanie nowoczesnych technologii, przy czym skupiono się głównie na wymiarze charakterystycznym. Biorąc pod uwagę stan obecnej techniki wartościowe byłoby rozważenie zalet i wad wynikających z zastosowania powszechnie dostępnych technologii SOI, w tym w szczególności FDSOI, oraz Fin-FET. W pracy ograniczono się do analizy klasycznej architektury układu PLL oraz możliwości jej usprawnienia pod kątem odporności na efekty radiacyjne. Czy brano pod uwagę inne architektury takie jak: układ PLL z detektorem mnożącym, układ PLL z detektorem próbującym, czy całkowicie cyfrowy układ PLL?

Wsk



Brak jest obszernej analizy wrażliwości zaprojektowanych układów na zmiany parametrów elektrycznych przyrządów półprzewodnikowych wynikających z rozrzutu parametrów procesu produkcyjnego, temperatury struktury krzemowej i napięcia zasilania. Dodatkowo recenzent nie znalazł informacji o uzyskaniu praw ochronnych wynikających z rejestracji topografii zaprojektowanych układów scalonych w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej. Biorąc pod uwagę olbrzymi nakład włożonej pracy oraz wysoki potencjał innowacyjny zaprojektowanych układów scalonych uzyskanie praw ochronnych wydaje się w pełni uzasadnione.

Praca jest również pozbawiona drobnych błędów stylistycznych, edytorskich i interpunkcyjnych. Przykładowo:

- powtórzenie słów *na przykładzie na przykład* na str. 3;
- występujące sierotki;
- brak kropek po numerach głównych rozdziałów;
- w podpisach rysunków i nadpisach tabel brak kropek po ich numerach porządkowych;
- nadmiarowo wtrącony tekst podpisu rys. 23 na str. 37;
- miejscami brak spacji po numerach podrozdziałów składających się z 3 liczb;
- brak przecinków przed słowem *which* (np. na str. 44, 46, 49, 57, 74);
- zastosowanie przecinka zamiast kropki dziesiętnej w tabeli 20 na str. 101;
- umieszczenie jednego rysunku na dwóch różnych stronach (np. rys. 88, rys. 91, rys. 109).

Reasumując należy zaznaczyć, że zauważone słabe strony rozprawy nie obniżają jej wartości naukowej.

## 7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Uzyskane wyniki badań naukowych mają bardzo dużą przydatność dla nauk technicznych. Opracowane w ramach rozprawy nowe rozwiązania konstrukcyjne zintegrowanych układów odczytowych CMOS stanowią istotny wkład w rozwój tego obszaru techniki. Ze względu na mały poziom szumów oraz szybkość działania są one szczególnie przydatne dla projektantów wielokanałowych układów odczytowych realizowanych w postaci specjalizowanych układów scalonych ASIC i przeznaczonych do współpracy z krzemowymi czujnikami paskowymi. Do praktycznych rezultatów rozprawy należy zaliczyć dwa wielokanałowe układy scalone SMX\_mini i PRINCSA oraz układ scalony synchronizacji fazy PLL, które zostały opracowane przez Doktorantkę. Uzyskane wyniki prac badawczych, w tym nowe rozwiązania konstrukcyjne, zwiększają obszar wiedzy dotyczącej metod projektowania układów elektroniki odczytu współpracujących z detektorami promieniowania jonizującego. Mogą one znaleźć zastosowanie w eksperymencie projektu badawczego CBM (*Compressed Baryonic Matter*), realizowanym w GSI – Instytucie Badań Ciężkich Jonów w Darmstadt, Niemcy. Wyniki doktoratu mogą również przyczynić się do zwiększenia jakości obrazowania promieniowania przez detektory pozycyjne promieniowania rentgenowskiego.

WBM

**8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:**

a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy

b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania

c/ spełniająca wymagania

d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem

e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Abstrahując od uwag wymienionych w punkcie 6. recenzji, należy stwierdzić, że Pani mgr inż. Weronika Zubrzycka prezentując nowe rozwiązania konstrukcyjne niskoszumowych układów odczytowych dla półprzewodnikowych detektorów promieniowania oraz metodę ich projektowania w nowoczesnych technologiach wytwarzania układów scalonych wykazała się dużymi zdolnościami i umiejętnościami do prowadzenia prac badawczych. Trzeba również zaznaczyć bardzo szeroki zakres zrealizowanych prac oraz szczególnie docenić uzyskanie przez Doktorantkę Diamentowego Grantu z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, który umożliwił sfinalizowanie doktoratu. Uważam, że przedstawiona do recenzji praca pt. „Niskoszumowe scalone układy z szybkim interfejsem cyfrowym do obrazowania promieniowania” spełnia zarówno wymagania formalne, stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy, oraz spełnia wymagania zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk technicznych. Wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



podpis