

dr inż. Mirosław Żołądź
Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Metrologii i Elektroniki
al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
tel. 12 617 32 99
faks 12 633 85 65
e-mail: zoladz@agh.edu.pl

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko.

Mirosław Żołądź

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

a) Dyplom magistra inżyniera uzyskany w roku 1999 na kierunku Automatyka i Robotyka WEAiE Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

b) Master of Engineering in Embedded Systems Design, Advanced Learning and Research Institute (ALARI), The University of Lugano, Switzerland, 2003

c) Stopień naukowy: doktor nauk technicznych w dyscyplinie elektronika,

Miejsce uzyskania: WEAiE Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Rok uzyskania: 2006 (uchwała o nadaniu stopnia doktora z dnia 28.09.2006)

Tytułu rozprawy doktorskiej: Komputerowa obróbka obrazów magnetycznych struktur domenowych

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

a) Katedra Elektroniki WEAiE Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (2004 r. – 2008 r.)

b) Katedra Metrologii i Elektroniki, WEAiIB Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (2008 r. - obecnie)

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,

Monografia p.t. „Systemy do wielokanałowej rejestracji elektrycznej aktywności tkanki nerwowej in vitro i in vivo oparte na specjalizowanych układach scalonych VLSI”

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy),

Autor: Mirosław Żołądź

Tytuł publikacji: monografia p.t. „Systemy do wielokanałowej rejestracji elektrycznej aktywności kanki nerwowej in vitro i in vivo oparte na specjalizowanych układach scalonych VLSI” (Monografia 320, s. 167, ISBN 978-83-7464-903-2)

Rok wydania: 2017

Nazwa wydawnictwa: Wydawnictwa AGH

Recenzenci wydawniczy: dr hab. inż. Krzysztof Poźniak, dr hab. inż. Krzysztof Duda

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Cel naukowy

Postęp w wytwarzaniu miniaturowych struktur mechanicznych w technologii MEMS (ang. *Micro Electro-Mechanical Systems*) oraz elektroniki zintegrowanej pozwolił na budowę systemów kontrolno-pomiarowych stymulujących rozwój wielu dziedzin nauki. Należą do nich m.in. bioelektronika i neurobiologia, w przypadku których szczególnie ważne okazały się matryce mikroelektrod wytwarzane w biokompatybilnych technologiach MEMS połączone z wielokanałowymi układami kondycjonowania sygnału. Matryce te są kluczowym elementem systemów pozwalających na rejestrację i/lub stymulację elektrycznej aktywności tkanki nerwowej w kilkudziesięciu lub kilkuset punktach jednocześnie. Systemy te są obecnie niezbędne w badaniach sposobu przetwarzania i kodowania informacji przez złożone sieci neuronowe, a ponadto pozwalają na odkrywanie nowych metod leczenia wielu chorób (np. choroba Parkinsona, dystonia, ból chroniczny, głęboka depresja, padaczka lekooporna i inne). Stanowią one również podstawowy element składowy wielu neuroprotez (np. protezy kończyn, proteza oka) oraz implantów dla sieci BAN (ang. *Body Area Network*).

Rejestracja aktywności neuronów za pomocą matryc mikroelektrod wymaga użycia odpowiednich układów kondycjonujących (zazwyczaj po jednym na elektrodę) o szumach własnych na poziomie kilkunastu mikrowoltów, impedancji wejściowej rzędu megaomów, wzmocnieniu rzędu setek V/V i paśmie częstotliwościowym rozciągającym się od pojedynczych herców do pojedynczych kiloherców. Co ważne zbudowanie ponad stukanałowego układu kondycjonującego posiadającego wspomniane parametry z elementów dyskretnych jest bardzo trudne technicznie i nieuzasadnione.

Skutecznym rozwiązaniem jest zastosowanie układów scalonych typu ASIC (ang. *Application Specific Integrated Circuit*) zbudowanych z wykorzystaniem technologii VLSI (ang. *Very Large Scale Integration*). Z tego powodu w wielu wiodących zespołach naukowych na świecie prowadzone są badania mające na celu takie zestawienie technologii VLSI i MEMS, które pozwoli na wyprodukowanie kompletnego zintegrowanego systemu rejestracyjno-stymulacyjnego składającego się z setek czy nawet tysięcy niezależnych pól pomiarowych.

Technologie VLSI umożliwiają budowę układów typu SoC (ang. *System on Chip*), które na jednej strukturze krzemowej (o powierzchni od kilkunastu do kilkudziesięciu milimetrów kwadratowych) pozwalają ulokować m.in. obwody elektroniczne zdolne zarówno do wielokanałowej rejestracji sygnałów neurobiologicznych jak i stymulacji tkanki nerwowej. Co więcej, prowadzone są obecnie prace nad układami typu SoC, które dzięki bezprzewodowej transmisji energii i danych pomiarowych pozwolą na całkowite wyeliminowanie połączeń kablowych między implantem (zawierającym układ SoC oraz matrycę elektrod), a systemem nadrzędnym.

O ile w literaturze przedmiotu można znaleźć wiele opracowań dotyczących np. minimalizacji szumów w układach kondycjonujących do rejestracji sygnałów neurobiologicznych czy też budowy niskomocowych nadajników radiowych, to brakuje opracowań dotyczących budowy kompletnych wielokanałowych systemów pomiarowych do równoczesnej rejestracji sygnałów z kilkuset punktów tkanki nerwowej. Tematyka ta jest o tyle istotna, że budowa tego typu systemów wymaga uwzględnienia wielu uwarunkowań wynikających m.in. z charakteru sygnałów neurobiologicznych, właściwości interfejsu elektroda–elektrolit, ograniczeń specyficznych dla budowy wielokanałowych układów scalonych, możliwych zakłóceń w złożonym analogowo-cyfrowym systemie pomiarowym czy też bezprzewodowej transmisji dużej ilości danych przy znacznych ograniczeniach dostępnej mocy.

Osiągnięte wyniki

Autor od wielu lat prowadzi badania dotyczące projektowania, budowy i testowania tego typu systemów w rzeczywistych eksperymentach neurobiologicznych. Zaowocowało to wypracowaniem wielu rozwiązań, które dzięki kompleksowej autorskiej analizie specyficznych ograniczeń i uwarunkowań występujących na styku neurobiologii i elektroniki pozwoliły na opracowanie kompletnych i niezawodnych systemów do wielokanałowej rejestracji elektrycznej aktywności tkanki nerwowej *in vitro* i *in vivo*, bazujących na specjalizowanych układach scalonych VLSI.

Osiągnięte wyniki zostały przedstawione w monografii pt. **„Systemy do wielokanałowej rejestracji elektrycznej aktywności tkanki nerwowej *in vitro* i *in vivo* oparte na specjalizowanych układach scalonych VLSI”**. Autor przedstawił w niej zarówno całościowy opis budowy systemów przeznaczonych do wielokanałowej rejestracji elektrycznej aktywności tkanki nerwowej, które oparto na specjalizowanych układach scalonych VLSI jak i podsumował swoją dotychczasową działalność naukową w tej dziedzinie.

W pracy opisano mechanizmy powstawania oraz specyfikę potencjałów czynnościowych i polowych oraz przedstawiono dwie podstawowe techniki rejestracji elektrycznej aktywności tkanki, tj. *in vitro* i *in vivo*. Omówiono konstrukcje dwóch głównych rodzajów matryc mikroelektrod pomiarowych, tj. ostrzowych i płaskich, oraz ich wpływ na tkankę nerwową. Przedstawiono model elektryczny pojedynczej mikroelektrody.

Następnie Autor określił wymagania stawiane układowi kondycjonującemu oraz digitalizującemu sygnały z elektrod, m.in.: minimalną impedancję wejściową, pasmo

częstotliwościowe, maksymalne dopuszczalne szумы, wzmacnienie, poziom stały i liniowość. Autor przeprowadził również szczegółową analizę minimalnej rozdzielczości i częstotliwości digitalizacji.

W rozdziale dotyczącym układów scalonych, przeznaczonych do wielokanałowego kondycjonowania sygnałów, opisano problemy specyficzne dla budowy obwodów analogowych w technologii CMOS VLSI, ze szczególnym uwzględnieniem budowy górnoprzepustowych filtrów RC o częstotliwościach odcięcia poniżej 1 Hz. Przedyskutowano kwestię doboru architektury stopnia wejściowego kanału kondycjonującego i przedstawiono metodę kodowania podpasmowego oraz omówiono dwa układy scalone stanowiące rdzeń systemów pomiarowych.

Pierwszym układem, na którym oparto systemy pomiarowe, był wielokanałowy scalony układ kondycjonujący NeuroA. Wykorzystuje on kanały kondycjonujące z oddzielnym filtrem wejściowym, filtrem pasmowym oraz sprzężeniem pojemnościowym znajdującym się między przedwzmacniaczem a wzmacniaczem wyjściowym, które odcina niezerowe napięcie stałe na wyjściu przedwzmacniacza. Testy neurobiologiczne wspomnianych systemów potwierdziły ich przydatność w efektywnej jednoczesnej rejestracji aktywności wielu neuronów, ale również uwidocznily potrzebę poprawy parametrów układu scalonego, takich jak pobór mocy czy szerokość pasma częstotliwościowego. Wskazały też na potrzebę przystosowania układu do jednoczesnej rejestracji potencjałów czynnościowych i polowych.

Wnioski płynące ze stosowania układu scalonego NeuroA pozwoliły autorowi na opracowanie układu scalonego NeuroB, w którym stopień wejściowy stanowi blok z pojemnościowym sprzężeniem zwrotnym. Układ został przystosowany do techniki kodowania podpasmowego dzięki wyposażeniu każdego kanału kondycjonującego w dwa filtry oddzielające potencjały czynnościowe od polowych. Dzięki efektywniejszej kontroli rezystancji w sprzężeniu zwrotnym oraz umieszczeniu kondensatorów nad warstwą zawierającą tranzystory możliwa była rezygnacja z kondensatorów MOS, które cechowały się znacznymi prądami upływu, co wykazały pomiary układu NeuroA. Cechą wyróżniającą układ scalony NeuroB spośród innych porównywalnych układów jest połączenie separacji potencjałów czynnościowych i polowych z bardzo niskim poborem mocy i bardzo małym rozmiarem pojedynczego kanału.

Budowa wielokanałowego układu pomiarowego do eksperymentów neurobiologicznych wymaga nie tylko zastosowania odpowiedniej jakości układów kondycjonowania sygnałów ale również rozwiązania wielu kwestii systemowych, takich jak kontrola układu scalonego, redukcja zakłóceń, jednoczesna digitalizacja dużej liczby sygnałów oraz wynikająca z tego konieczność transmisji, prezentacji i archiwizacji dużej ilości danych. W przypadku pomiarów *in vitro* konieczna może być również integracja niektórych elementów systemu pomiarowego z układem podtrzymywania życia. Kwestie te omówiono w rozdziale dotyczącym budowy wielokanałowych modułowych systemów pomiarowych do rejestracji *in vivo* i *in vitro* z użyciem płaskich i ostrzowych matryc mikroelektrod.

Weryfikacja działania opisanych systemów pomiarowych została przedstawiona w rozdziale omawiającym pomiary neurobiologiczne. Wspólnie z grupą neurobiologów z

Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz Łódzkiego przeprowadzono wiele eksperymentów in vivo i in vitro z użyciem płaskich i ostrzowych matryc mikroelektrod. Zarejestrowano i przeanalizowano potencjały polowe (w tym rytm theta) i czynnościowe w hipokampie oraz jądrze niepewnym. Wysoka jakość zarejestrowanych sygnałów neurobiologicznych potwierdziła dobre parametry zarówno skalonych układów kondycjonujących, jak i systemów pomiarowych, umożliwiając nawet kilkunastokrotne przyspieszenie pomiarów, poprawę ich wiarygodność dzięki jednoczesnej rejestracji z wielu punktów tkanki oraz zmniejszenie liczby zwierząt potrzebnych do eksperymentów.

Na podstawie zebranych doświadczeń (zdobytych podczas projektowania układów skalonych, budowy systemów pomiarowych oraz eksperymentów neurobiologicznych) zaprojektowano układ scalony typu SoC (ang. System on Chip) do wielokanałowej rejestracji elektrycznej aktywności tkanki nerwowej. Na strukturze krzemowej o rozmiarze 5 mm x 5 mm umieszczono 64 kanały kondycjonujące, multiplekser analogowy, przetwornik A/C, układ kontrolny zapewniający akwizycję, kompresję i transmisję danych, mikromocowy nadajnik radiowy oraz obwody niezbędne do bezprzewodowego (indukcyjnego) zasilania wymienionych bloków.

Ze względu na małą, w stosunku do ilości danych pomiarowych, przepustowość mikromocowego nadajnika radiowego (około 1/10), układ kontrolny został wyposażony w moduł logarytmicznej kompresji danych. Jako że kompresja logarytmiczna jest metodą stratną przeprowadzono również szczegółową analizę wpływu parametrów kompresji na jakość odwzorowania przesyłanych potencjałów czynnościowych.

Cechą wyróżniającą zaprezentowany układ SoC spośród analogicznych rozwiązań jest połączenie techniki kodowania podpasmowego z logarytmiczną kompresją danych przy zachowaniu niskiego poboru mocy.

Do oryginalnych osiągnięć autora można zaliczyć:

- projekt układu scalonego NeuroB do wielokanałowego kondycjonowania potencjałów czynnościowych i polowych, przystosowanego do użycia techniki kodowania podpasmowego, istotnego w logarytmicznej kompresji danych podczas transmisji bezprzewodowej (podrozdz. 5.3);
- projekt kompletnego systemu pomiarowego do rejestracji potencjałów neurobiologicznych in vivo i in vitro z użyciem ostrzowej matrycy 16 mikroelektrod (rozdz. 6, podrozdz. 6.2);
- projekt kompletnego systemu pomiarowego do rejestracji potencjałów neurobiologicznych, przystosowanego do rejestracji in vitro z użyciem płaskich matryc 256 mikroelektrod, zintegrowany z układem podtrzymania życia tkanki nerwowej (rozdz. 6, podrozdz. 6.3);
- testy systemu opisanego w podrozdziale 6.2, wykonane we współpracy z Katedrą Neurobiologii Uniwersytetu Łódzkiego, polegające na rejestracji potencjałów czynnościowych oraz rytmu theta in vitro ze skrawka tkanki nerwowej wypreparowanego ze struktury hipokampu szczura (podrozdz. 7.2);

- testy systemu opisanego w podrozdziale 6.3, przeprowadzone w Katedrze Neurobiologii Uniwersytetu Łódzkiego, polegające na obserwacji potencjałów czynnościowych oraz rytmu theta w skrawku tkanki nerwowej wypreparowanym ze struktury hipokampu oraz w skrawku tkanki nerwowej wypreparowanym z obszaru tylnego podwzgórza (podrozdz. 7.1);
- testy systemu opisanego w podrozdziale 6.2, wykonane we współpracy z Zakładem Chronobiologii Uniwersytetu Jagiellońskiego, polegające na rejestracji in vivo i badaniu korelacji czasowej potencjałów czynnościowych, aktywności typu LIA (ang. Large Irregular Activity) oraz rytmu theta ze struktury hipokampu oraz struktury jądra niepewnego szczura pozostającego pod narkozą (podrozdz. 7.3);
- projekt układu scalonego typu SoC do wielokanałowej bezprzewodowej rejestracji elektrycznej aktywności tkanki nerwowej (rozdz. 8);
- szczegółową analizę wpływu, zastosowanej w układzie SoC, logarytmicznej kompresji danych na stopień zniekształcenia sygnałów reprezentujących potencjały czynnościowe (podrozdz. 8.6.2).

W monografii Autor przedstawił zarówno wyniki zamieszczone w opublikowanych pracach, jak i rezultaty oryginalnych niepublikowanych dotychczas projektów i badań. Te ostatnie zostały zamieszczone w:

- rozdziale 4. dotyczącym parametrów kondycjonowania i cyfryzacji potencjałów czynnościowych i polowych (szczególnie podrozdział 4.5 poświęcony rozdzielczości i częstotliwości przetwornika A/C);
- podrozdziale 5.1.5 dotyczącym realizacji filtrów RC o dużych stałych czasowych;
- podrozdziale 5.3 zawierającym szczegółowy opis scalonego układu kondycjonującego NeuroB wraz z analizą uzyskanych parametrów użytkowych;
- podrozdziałach 7.2 i 7.3 przedstawiających wyniki testów neurobiologicznych in vitro i in vivo scalonego układu kondycjonującego NeuroB z użyciem ostrzowych matryc mikroelektrod;
- podrozdziałach 8.4 i 8.6.2 zawierających opis multipleksera analogowego oraz szczegółową analizę wykorzystania kompresji logarytmicznej pod kątem transmisji potencjałów czynnościowych w układzie scalonym typu *System on Chip*.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

1) Projekty i prace związane z obrazowaniem rozkładu promieniowania X

1. Projekt architektury i prototyp serwera (oprogramowanie pośredniczące między kamerą a aplikacjami klienckimi) kamery promieniowania X dla firmy Rigaku, wykorzystane przy budowie kamery HyPix6000 (<https://www.rigaku.com/en/products/protein/hypix6000>), firma Rigaku Corporation (Tokyo), rok 2011

2. Budowa superszybkiej kamery promieniowania X opartej na układach UFXC32k wyposażonej w interfejs USB3.0 przeznaczoną do eksperymentów z użyciem promieniowania synchrotronowego (artykuł w przygotowaniu), Akademia Górniczo-Hutnicza, lata 2015-2017

Z działalnością naukową w tym zakresie wiążą się min. następujące publikacje:

- a. P. Maj, P. Gryboś, R. Szczygieł, M. Żołądź, T. Sakumura, Y. Tsuji: "18k channels single photon counting readout circuit for hybrid pixel detector", Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment. — 2013 vol. 697, s. 32–39.
- b. P. Maj, P. Grybos, K. Kasinski, A. Koziol, A. Krzyzanowska, P. Kmon, R. Szczygiel and M. Zoladz: „Measurements of Ultra-Fast single photon counting chip with energy window and 75 μm pixel pitch with Si and CdTe detectors”, Journal of Instrumentation, 2017, vol. 12, pp. 1-6



