

DISSERTATIONS
MONOGRAPHS 117

PAWEL GRYBOS

Low Noise Multichannel Integrated Circuits
in CMOS Technology
for Physics and Biology Applications

AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Kraków 2002

Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Redaktor Naczelny Uczelnianych Wydawnictw
Naukowo-Dydaktycznych: *Andrzej Wichur*
Z-ca Redaktora Naczelnego: *Beata Barszczewska-Wojda*

Recenzent: *Władysław Dąbrowski*

Druk wykonano ze składu dostarczonego przez Autora

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2002
ISSN 0867-6631

Redakcja Uczelnianych Wydawnictw Naukowo-Dydaktycznych
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. 617-32-28, tel./fax 636-40-38
e-mail: wydagh@uci.agh.edu.pl
<http://galaxy.uci.agh.edu.pl/~wydagh>

Contents

Summary.....	7
Streszczenie.....	8
List of symbols.....	9
1. Introduction.....	15
2. Some important aspects of low noise design of multichannel mixed-mode ASICs.....	17
2.1. Noise modelling in MOS transistors.....	18
2.1.1. Channel thermal noise.....	18
2.1.2. Flicker noise.....	21
2.2. Crosstalk in mixed-mode integrated circuits.....	23
2.2.1. Generation, transmission and reception of switching noise.....	24
2.2.2. Reducing the noise generation.....	27
2.2.3. Increasing the immunity of analogue part.....	27
2.2.4. Isolation techniques.....	28
2.3. Random matching and systematic offsets.....	30
2.3.1. The mismatch parameters of MOS transistors.....	31
2.3.2. Matching in various processes.....	34
2.3.3. Current matching in MOS transistors.....	35
2.3.4. Random matching in circuits.....	35
2.3.5. Layout rules for good matching.....	37
2.3.6. Matching on multichip modules.....	38
2.3.7. Mismatch simulation using the Monte Carlo analysis.....	39
3. Binary readout IC for X-ray imaging using silicon strip detector.....	40
3.1. Silicon strip detector.....	40
3.2. Detector readout architecture.....	42
3.3. Binary readout architecture of RX64 IC.....	46
3.4. Front-end circuit.....	47
3.4.1. Preamplifier.....	51
3.4.2. Shaper.....	53
3.4.3. Discriminator.....	54
3.4.4. Matching and immunity to the switching noise.....	55

3.5. Digital to analogue converters	57
3.6. Calibration circuit	58
3.7. Digital part	59
3.7.1. Pseudo-random counters	59
3.7.2. Control block	61
3.7.3. I/O circuit	61
3.8. Layout of RX64	62
3.9. Test results	64
3.9.1. Testability features	64
3.9.2. Basic functionality test	65
3.9.3. DAC test	65
3.9.4. Gain, noise and calibration	66
3.9.5. High counting rate characteristics	71
3.10. Application of RX64 IC in position sensitive measurements at powder diffractometer	74
4. Low noise multichannel IC for recording neuronal signals using microelectrode array	77
4.1. Extracellular recording	78
4.1.1. Multielectrode array	78
4.1.2. Readout electronics for extracellular recording	80
4.1.3. Requirements for readout electronics dedicated to retina measurements	81
4.2. Architecture of NEURO64 IC	82
4.3. Analogue signal processing chain	84
4.3.1. Low noise preamplifier design	84
4.3.2. Experimental optimisation of operation condition for the preamplifier stage	89
4.3.3. AC coupling circuit	92
4.3.4. Band-pass filter	95
4.3.5. Output amplifier	101
4.4. Analogue multiplexer	102
4.5. Mismatch modelling of multichannel chip	105
4.6. Layout of NEURO64	107
4.5. Summary of NEURO64 parameters	107
4.6. Neurobiological measurements using NEURO64	109
5. Final remarks	111
Appendix I	113
Appendix II	115
Appendix III	117
Appendix IV	119
References	121

PAWEL GRYBOS

Low Noise Multichannel Integrated Circuits in CMOS Technology for Physics and Biology Applications

Summary

This monograph focuses on important aspects of designing multichannel Application Specific Integrated Circuits in CMOS technology. References relevant to noise modelling in circuit simulators, effects of crosstalk in mixed-mode integrated circuits and matching related problems have been briefly reviewed. The author discusses the problems specific for multichannel integrated circuits on examples of two his designs, 64-channel chips RX64 and NEURO64. Design specifications, proposed architectures of multichannel chips and optimisation details for circuit design and mask layout of various blocks are described. Measurement results obtained for the realised prototypes are compared with the design requirements and simulation results.

RX64 integrated circuit has been designed for the digital readout of silicon strip detectors used for one-dimensional position-sensitive X-ray imaging. The chip consists of low noise analogue front-end electronics and digital blocks for data storage, bias control and communication via a serial link. This work describes an architecture of the integrated circuit with a special attention paid to noise optimisation, crosstalk minimisation and matching performance. The testability features and measurement results are also presented. The RX64 chips with a silicon strip detector are used in the Roentgen diffractometer. They reduce the measurement time by two orders of magnitude. This opens new possibilities in experimental techniques for polycrystal and thin layers investigations.

NEURO64 integrated circuit has been designed for experimental neurobiology to record signals from live neurones. The properties of extracellular neuronal signals determine noise optimisation of the readout electronics in the low frequency range where the $1/f$ noise dominates. This monograph describes a new concept of filter and AC coupling which operate in the low frequency range. The channel-to-channel matching of parameters is also important in this design. The data from analogue channels after multiplexing are sent out from the chip via a serial link. The chip is used for the readout of neuronal signals from retina to understand the processing and encoding of visual information in the eye, which then is sent to the brain as trains of voltage spikes.

PAWEL GRYBOS

Niskoszumne wielokanalowe układy scalone w technologii CMOS dla potrzeb eksperymentów fizyki i biologii

Streszczenie

W pracy przedstawiono istotne aspekty związane z projektowaniem wielokanalowych specjalizowanych układów scalonych w technologii CMOS. Dokonując przeglądu literatury, omówiono sposób modelowania szumów, zjawisko przesłuchu w układach typu „mixed-mode” oraz minimalizację efektów związanych z rozrzutami parametrów elementów wykonanych w technologii VLSI. Następnie na przykładzie dwóch 64-kanalowych układów scalonych RX64 i NEURO64, będących wynikiem prac autora, przedyskutowano problemy specyficzne dla wielokanalowych układów scalonych. Omówiono założenia projektowe, proponowane architektury układów wielokanalowych oraz szereg detali związanych z optymalizacją poszczególnych bloków funkcyjnych zarówno na etapie schematu, jak i rysowania masek układu scalonego. Oba układy zostały zrealizowane, a ich zmierzone parametry porównane z założeniami projektowymi i wynikami symulacji.

Pierwszy z układów RX64 został zaprojektowany do odczytu paskowych detektorów krzemowych używanych do pozycjoczułej jednowymiarowej detekcji promieniowania X. Układ zawiera niskoszumne analogowe układy elektroniki i bloki cyfrowe umożliwiające przechowywanie danych, kontrole polaryzacji i komunikacje ze światem zewnętrznym poprzez łącza szeregowo. W pracy omówiono architekturę układu scalonego ze zwróceniem szczególnej uwagi na optymalizację szumowa, minimalizację rozrzutu pomiędzy kanałami oraz integrację bloków analogowych i cyfrowych w jednym układzie scalonym. Przedstawiono również procedury testowe i wyniki pomiarów. Układ RX64 wraz z paskowym detektorem krzemowym jest obecnie stosowany jako moduł odczytowy w dyfraktometrze rentgenowskim, pozwalając na 100-krotne zredukowanie czasu pomiaru. Otwiera to nowe możliwości w technice eksperymentalnej do badania polikrystalłów i cienkich warstw.

Układ NEURO64 został zaprojektowany dla potrzeb neurobiologii eksperymentalnej do odczytu sygnałów pochodzących z żywych komórek neuronowych. Specyfika sygnałów neuronowych wymagała optymalizacji szumowej elektroniki odczytu, tym razem w zakresie niskich częstotliwości, gdzie dominująca składowa jest szum $1/f$. W pracy omówiono szczegółowo nową koncepcję filtrów i sprzężenia zmiennoprądowego pracującego w zakresie niskich częstotliwości. Zwrócono szczególną uwagę na minimalizację rozrzutu parametrów analogowych pomiędzy kanałami. Dane z systemu wielokanalowego dzięki zaimplementowaniu analogowego multipleksera wysyłane są na zewnątrz poprzez łącza szeregowo. Układ stosowany jest obecnie z powodzeniem do odczytu sygnałów pochodzących z siatkówki oka w celu zrozumienia sposobu kodowania informacji w oku, która następnie w formie paczek impulsów napięciowych przesyłana jest do mózgu.

List of symbols

A_I	–	current ratio
A_1, A_2	–	fit parameters
A_{vd}	–	differential voltage gain
AF	–	SPICE exponent constant for flicker noise
A_b	–	area proportionality constant of variation of current factor
A_{Cox}	–	area proportionality constant of variation of gate oxide capacitance
A_g	–	area proportionality constant of variation of body factor
A_L	–	proportionality constant of variation of channel length
A_m	–	area proportionality constant of variation of mobility
A_P	–	area proportionality constant of variation of parameter P
A_W	–	proportionality constant of variation of channel width
A_{VT0}	–	area proportionality constant of variation of threshold voltage
a	–	constant
a_F	–	fit slope
\mathbf{a}	–	exponent constant of flicker noise
b	–	constant
\mathbf{b}	–	current factor
C	–	capacitance
C_b, C_{VT0}	–	matching parameters
C_{ox}	–	oxide capacitance per unit area
c	–	constant
D	–	spacing distance
D_I	–	threshold adjust implant dose
E	–	electric field
ENC	–	equivalent noise charge
$error_i$	–	integral nonlinearity error for i value at the input
\mathbf{e}_s	–	silicon permittivity
\mathbf{e}_{ox}	–	oxide permittivity
F_v, F_{vf}, F_i	–	filter constants
f	–	frequency
f_0	–	noise count rate at zero threshold level
\mathbf{f}_F	–	Fermi potential
\mathbf{f}_{MS}	–	gate-semiconductor work function difference

g_{ds}	–	source-drain conductance
g_m	–	gate transconductance
g_{mb}	–	body transconductance
\mathbf{g}	–	body factor
I_{DB}	–	drain-bulk current
I_{DET}	–	detector leakage current
I_{DS}	–	drain-source current
$\frac{\overline{di^2}}{df}$	–	power spectral density of current noise
j	–	imaginary unit
J	–	current density
k	–	Boltzman constant
K_f	–	flicker noise constant
K_{fn}, K_{fp}	–	flicker noise constants of NMOS and PMOS transistors
KF	–	SPICE flicker noise constant
K_v	–	voltage gain
K_{vd}	–	differential voltage gain
K_0	–	gain parameter
L	–	channel length
L_{ind}	–	inductance
L_{eff}	–	effective channel length
\mathbf{l}	–	channel length modulation parameter
\mathbf{m}	–	mobility
$\mathbf{m}_n, \mathbf{m}_p$	–	mobility in the channel of NMOS and PMOS transistors
\mathbf{m}_{eff}	–	effective mobility
N_B	–	bulk doping density
P	–	parameter
p_1, p_2	–	poles of transfer function
q	–	elementary charge
Q	–	charge
Q_{inj}	–	injected charge
Q_{inv}	–	total inversion channel charge
Q_{ox}	–	fixed oxide charge density
R	–	resistance
S_b	–	variation of the current factor with a distance
S_g	–	variation of the body factor with a distance
S_p	–	variation of the parameter P with a distance
S_{VT0}	–	variation of the threshold voltage with a distance
\mathbf{s}	–	conductivity
\mathbf{s}_n	–	voltage noise rms
T	–	absolute temperature
T_{epi}	–	epi-layer thickness
T_p	–	peaking time
t	–	time

t_{ox}	–	oxide thickness
\mathbf{t}	–	time constant of the filter
$\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2$	–	time constants in the preamplifier
$\mathbf{t}_{sh}, \mathbf{t}_{sr}, \mathbf{t}_{out}$	–	time constants in the multiplexer
W	–	channel width
\mathbf{w}	–	angular frequency
V_{dd}, V_{df}, V_{ss}	–	bias voltages
V_{DS}	–	drain-source voltage
V_{DSsat}	–	drain-source saturation voltage
V_{GS}	–	gate-source voltage
V_{fit-i}	–	value of fit to the DAC output voltage for i value at the input
V_{osr}	–	random offset
V_{out-i}	–	DAC output voltage for i value at the input
V_T	–	threshold voltage
V_{T0}	–	threshold voltage for $V_{SB} = 0$
V_{TH}	–	comparator threshold voltage
V_{SB}	–	source-bulk voltage
$\frac{dv^2}{df}$	–	power spectral density of voltage noise
v_{out}	–	output voltage
z_1, z_2	–	zeros of transfer function

Prace te dedykuje moim Rodzicom