АНОТАЦІЯ

Бенько Т.Г. Інтегральні перетворювачі сигналів для сенсорних мікросистем-на-кристалі зі структурами кремній-на-ізоляторі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 171 Електроніка – Прикарпатський національний університет імені В.Стефаника, Івано-Франківськ, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розробленню і дослідженню елементної бази сенсорних мікросистем-на-кристалі зі структурами кремній-на-ізоляторі, а саме інтегральних перетворювачів сигналів (ІПС) фізичних величин на основі комплементарних метал-окисел-напівпровідникових (КМОН)-структур та структур кремній-на-ізоляторі (КНІ) і призначених для отримання й безпосереднього опрацювання первинної інформації на кристалі мікросистем сенсорного типу чи інтелектуальних сенсорів.

Обґрунтування актуальності обраної теми дисертаційного дослідження, мета дослідження, основні завдання, наукова новизна і практична цінність роботи висвітлені у вступі.

У першому розділі в процесі аналізу літературних джерел розглянуто мікроелектронні технології для формування елементної бази сенсорних мікросистем-на-кристалі, зокрема, проаналізовано можливості використання арсенід-галієвих інтегральних структур. Значний інтерес для цієї мети становлять стандартні КМОН-структури на основі об’ємного кремнію. Проте більш перспективними для створення інтегральних перетворювачів сигналів (ІПС) є структури кремній-на-ізоляторі. Параметри первинних чутливих елементів у мікросистемах-на-кристалі сенсорного типу визначаються змінами фізичних властивостей як матеріалів, так і від впливу досліджуваного середовища, напр., зміною імпедансу, ємності, константами пружності, орієнтаційними ефектами інтегральних елементів мікросистеми. І можливості сенсорів з цієї точки зору визначаються можливостями первинних складових

сенсорів - первинних чутливих елементів, перетворювачів. Показано, що структури кремній-на-ізоляторі порівняно з іншими мають ряд суттєвих переваг як конструктивний матеріал для проектування елементів ІПС, так і володіють значно кращими характеристиками, порівняно з КМОН-структурами за параметрами швидкодії, радіаційної стійкості, температурного діапазону, споживаної потужності, можливостей створення тривимірних приладних структур.

Другий розділ присвячений дослідженням властивостей та характеристик матеріалів зі структурою «кремній-на-ізоляторі» з точки зору використання у створенні інтегральних перетворювачів сигналів для мікросистемних використань. Зокрема, було досліджено характеристики магнітоору полікристалічних кремнієвих плівок в структурах типу «напівпровідник-на-ізоляторі», а також частотні характеристики вказаних структур. Ці результати показують можливості створення інтегральних перетворювачів реєстрації магнітних полів за наднизьких температур.

Результати досліджень п’єзоелектричного опору в нерекристалізованих і рекристалізованих шарах полікремнію-на-ізоляторі свідчать про те, що для розробки сенсорів механічних величин, які мають достатню тензочутливість до вимірюваного параметра, необхідно використовувати лазерно-рекристалізовані шари поліремнію-на-ізоляторі з концентрацією р-типу провідності 4, 8×10^{18} $см^{-3}$ при $300^{o}K$.

Запропоновано метод зменшення динамічної потужності базової схеми КМОН – інвертора шляхом введення у вихідне коло інвертора двох додаткових послідовно-з’єднаних р- і n- канальних МОН- транзисторів, з окремим керуванням у моменти наростання і спадання фронтів вхідних логічних сигналів, що дозволяє зменшити динамічну потужність до 78% порівняно із базовою схемою інвертора. Це буде вигідним для побудови цифрових елементів ІПС, особливо, потужних, напр., для зовнішнього інтерфейсу вихідних каскадів мікросистем-на-ізоляторі.

У третьому розділі розроблено схемотехнічні рішення базових елементів

ІПС з використанням матричних комірок на основі як КМОН-, так і КНІ КМОН - технологій, наведено результати їх приладно-технологічного та схемо-топологічного моделювання й параметричної оптимізації. Запропоновано схемотехнічні рішення інтегральних елементів на основі КМОН- інверторів для реєстрації змін надмалих ємностей як зі стандартним, так і подвійним керуванням підканальною областю в КНІ МОН - транзисторах. Проведено їх комп'ютерне схемотехнічне моделювання з урахуванням конструктивних параметрів КМОН-транзисторів, інтегральних чутливих елементів резистивного та ємнісно-індуктивного типів. Такі елементи можуть бути використані як сенсорні безпосередньо вбудованими в мікросистему-на-кристалі чи реєстрації зовнішніх впливів або як елементи для самотестування мікросистеми-на-кристалі сенсорного типу Схемотехнічне комп'ютерне моделювання інтегральних ємнісних сенсорів, вбудованих безпосередньо в мікросистему-на-кристалі показало можливості їх використання для реєстрації і дослідження змін надмалих величин ємностей чутливих елементів в межах 0.1-1.0 пФ, що співрозмірно із паразитними ємностями затворів КМОН-транзисторів.

Проведено схемотопологічне моделювання ІПРС і показано що такі перетворювачі зі структурами КНІ порівняно зі стандартними КМОН-структурами мають покращені температурні та часові характеристики та є придатними для проектування ІПС, інтелектуальних сенсорів та сенсорних мікросистем-на-кристалі.

У четвертому розділі розроблено інтегральні пристрої для зовнішнього інтерфейсу мікросистеми-на-кристалі, цифрової та математичної обробки і перетворення сигналів для мікросистемних використань. Зокрема, проведено схемотехнічне комп'ютерне моделювання електричних, часових температурних та енергетичних характеристик розроблених КНІ КМОН програмованих вихідних буферних каскадів для сенсорних мікросистем-на-кристалі безпосередньо із їх топології, запропоновано рекурсивні інтегральні пристрої сортування бінарних даних, розроблено і проведено моделювання інтегральних

пристроїв піднесення чисел до квадрату на блоках ПЛІС, як елементах мікросистем-на-кристалі. Показано перспективи використання сенсорних мікросистем-на-кристалі для створення спеціалізованих сенсорних пристроїв.

Спроектовано аналогічні між собою топології вхідних каскадів аналітичної мікросистеми-на-кристалі як на основі об'ємних КМОН-структур, так і на основі КНІ КМОН-структур. Проведено їх схемотопологічне моделювання. Показано, що вихідні каскади на КНІ-структурах мають меншу затримку вихідного сигналу відносно вхідного (4 пс та 7 пс відповідно) та меншу споживану потужність (6,89 мВт та 8,88 мВт відповідно) порівняно з об'ємною КМОН-технологією.

В результаті використання просторово – часової методики в роботі побудовано структури базового та мінімізованого рекурсивних пристроїв та зроблена порівняльна оцінка швидкодії та апаратних затрат за допомогою синтезу даних пристроїв на ПЛІС. Отримані результати синтезу моделей базового та мінімізованого рекурсивних пристроїв, які дають змогу зробити висновки, що дані пристрої мають майже однакову швидкодію, а по затратам обладнання кращі результати дають мінімізовані рекурсивні пристрої сортування. Вказані пристрої можуть мати використання у комплексі з інтегральними перетворювачами сигналів для мікросистемних використань та в цілому розширять елементну базу.

Ключові слова: сенсорна мікросистема-на-кристалі, інтегральні перетворювачі сигналів, сенсорні елементи, базова матрична комірка, КМОН - структури, структури «кремній-на-ізоляторі», КНІ МОН - транзистор, схемо-технічне моделювання.

SUMMARY

Benko T.G. Integral signal converters for sensor microsystems-on-chip.– Qualifying Scientific Work on the Rights of Manuscript.

Dissertation submitted for the degree Doctor of Philosophy in the field of knowledge 17 Electronics and telecommunications on the specialty 171 Electronics. – Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, 2024.

The dissertation is devoted to the development and research of the element base of sensor microsystems-on-chip, namely, integral converters of signals of physical quantities based on complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) structures and silicon-on-insulator (SOI) structures and intended for obtaining and direct processing of primary information on the chip of sensor-type microsystems or intelligent sensors.

The introduction highlights the relevance of the chosen topic of the dissertation research, the purpose of the research, the main tasks, the scientific novelty and the practical significance of the work.

In the first chapter, in the process of analyzing literary sources, microelectronic technologies for the formation of the element base of sensor microsystems-on-chip were considered, in particular, the possibilities of using arsenide-gallium integrated structures were analyzed. Standard CMOS structures based on bulk silicon are of considerable interest for this purpose. However, silicon-on-insulator structures are more promising for creating integrated signal converters. The parameters of the primary sensitive elements in microsystems-on-chip are determined by changes in the physical properties of both materials and the influence of the studied environment, e.g., changes in impedance, capacitance, elasticity constants, orientational effects of integral elements of the microsystem. And the capabilities of sensors from this point of view are determined by the capabilities of primary components of sensors - primary sensitive elements, transducers. It is shown that silicon-on-insulator structures compared to others have a number of significant advantages as a structural material for designing elements of integral signal converters, and have significantly better characteristics, compared to CMOS structures, in terms of speed, radiation resistance, temperature range, power consumption, possibilities of creating three-dimensional instrument structures.

The second chapter is dedicated to researching the properties and characteristics of materials with a "silicon-on-insulator" structure from the point of view of use in the creation of integrated signal converters for microsystem applications. In particular, the magnetotor characteristics of polycrystalline silicon films in

semiconductor-on-insulator structures, as well as the frequency characteristics of these structures, were investigated. These results show the possibility of creating integrated converters for recording magnetic fields at low temperatures.

The results of piezoelectric resistance studies in non-recrystallized and recrystallized polysilicon-on-insulator layers indicate that for the development of sensors of mechanical quantities that have sufficient strain sensitivity to the measurement parameter, it is necessary to use laser-recrystallized polysilicon-on-insulator layers with a concentration of p- conductivity type $4{,}8\times10^{18}$ cm^{-3} at $300^{o}K$.

A method of reducing the dynamic power of the basic circuit of the CMOS inverter is proposed by introducing into the output circuit of the inverter two additional series-connected p- and n-channel MOS transistors, with separate control at the moments of rising and falling edges of the input logic signals, which allows to reduce the dynamic power up to 78% compared to the basic inverter scheme. This will be beneficial for the construction of digital ICS elements, especially powerful ones, for example, for the external interface of output stages of microsystems-on-chip.

In the third chapter, the circuit solutions of the basic elements of integral signal converters using matrix cells based on both CMOS and SOI CMOS technologies are developed, the results of their instrumentation-technological and circuit-topological modeling and parametric optimization are given. Schematic solutions of integrated elements based on CMOS inverters are proposed for recording changes in ultra-small capacitances with both standard and double control of the subchannel region in SOI MOS transistors. Their computer circuit modeling was carried out taking into account the design parameters of CMOS - transistors, integral sensitive elements of resistive and capacitive-inductive types. Such elements can be used as sensors directly embedded in a microsystem-on-chip or for recording external influences or as elements for self-testing of a microsystem-on-chip. Schematic computer modeling of integrated capacitive sensors built directly into the microsystem-on-chip showed the possibility of their use for registration and research of changes in the ultra-small

values of the capacitances of sensitive elements in the range of 0.1-1.0 pF, which is commensurate with the parasitic capacitances of the gates of CMOS transistors.

Circuit topological modeling of ICLS was carried out and it was shown that such converters with SOI structures compared to standard CMOS structures have improved temperature and time characteristics and are suitable for designing ICS, intelligent sensors and sensor microsystems-on-a-crystal.

In the fourth chapter, integrated devices for the external microsystem-on-chip interface, digital and mathematical processing and signal conversion for microsystem uses are developed. In particular, circuit engineering computer modeling of the electrical, time-temperature, and energy characteristics of the programmable output buffer stages developed by SOI CMOS for sensor microsystems-on-chip directly from their topology was carried out, recursive integrated devices for sorting binary data were proposed, and simulations of integral devices for raising numbers were developed and carried out to the square on PLIC blocks, as elements of microsystems-on-chip. The prospects of using sensor microsystems-on-chip to create specialized sensor devices are shown.

Similar topologies of the input cascades of the analytical microsystem-on-chip are designed both on the basis of bulk CMOS-structures and on the basis of SOI CMOS-structures. Their schematic topological modeling was carried out. It is shown that the output cascades on SOI-structures have a lower delay of the output signal relative to the input (4 ps and 7 ps, respectively) and lower power consumption (6.89 mW and 8.88 mW, respectively) compared to bulk CMOS technology.

As a result of the use of the spatio-temporal method, the structures of the basic and minimized recursive devices were built and a comparative assessment of performance and hardware costs was made using the synthesis of device data on the PLIC. The obtained results of the synthesis of the models of the basic and minimized recursive devices, which allow us to conclude that these devices have almost the same speed, and in terms of equipment costs, the best results are given by minimized recursive sorting devices. These devices can be used in combination with integrated

signal converters for microsystem applications and will generally expand the element base.

Key words : sensor microsystem-on-a-chip, integrated signal converters, sensor elements, basic matrix cell, CMOS structures, "silicon-on-insulator" structures, SOI MOS-transistor, circuit-technical modeling.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, що індексується в міжнародних наукометричних базах:

1. Igor Kogut, Victor Holota, Taras Benko, Anatoliy Druzhinin, Yuriy Khoverko. Method of reducing CMOS inverter switching energy // Applied Nanoscience (Switzerland). 2023. V. 13, Issue 12. P. 7501-7511.

DOI:10.1007/s13204-023-02929-9

URL: https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85167511707&origin=resultslist

2. Igor Kogut, Victor Holota, Taras Benko, Anatoliy Druzhinin, Yuriy Khoverko. Development of Inverter Circuits with Dual Control Subchannel Areas of Integral CMOS Sensor Element // Physics and Chemistry of Solid State, 2021. P. 729-733.

DOI: 10.15330/PCSS.22.4.729-733

URL: https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85122241374&origin=resultslist

3. Novosiadly S.P. Benko T.H. Kogut I.T. Features of electrophysical diagnostics of schottky field transistors based on GaAs epitaxial layers on silicon substrates for microsystem applications_// Physics and Chemistry of Solid State. 2019. V. 20, N. 3. P. 311-317.

DOI:10.15330/pcss.20.3.311-317

URL: https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85147471180&origin=resultslist

4. Igor Kogut, Victor Holota, Taras Benko, Anatoliy Druzhinin, Yuriy Khoverko. Simulation an integrated sensor as an element of CMOS inverter // Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. 2021. Article number 9385245. P. 15-18.

DOI:10.1109/CADSM52681.2021.9385245

URL: https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85104519283&origin=resultslist

5. Igor Kogut, Victor Holota, Taras Benko, Anatoliy Druzhinin, Yuriy Khoverko. Magnetoconductance of Polycrystalline Silicon in SemOI-structures for Sensors Application // International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design. 2021. P. 98-101.

DOI:10.1109/MEMSTECH53091.2021.9468079

URL: https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85116356339&origin=resultslist

Публікації в збірках наукових конференцій:

6. Stepan Novosiadlyi,Volodymyr Mandzyuk, Volodymyr Hryha, Andriy Terletsky, Taras Benko,Volodymyr Lukovkin. Modified Pearson model for high-energy multi-charge implantation and impurity activation for sensor microsystems // 40th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2020. 2020. Article number 9088870. P. 315-318.

DOI:10.1109/ELNANO50318.2020.9088870

URL: https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85086311334&origin=resultslist

7. Igor Kogut, Victor Holota, Taras Benko, Anatoliy Druzhinin, Volodymyr Pavlysh, Yuriy Khoverko. Simulation of Sensor Capacitive Elements Built Into the Microsystem-On-Chip // 40th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2020. 2020. Article number 9088744. P. 211-215.

DOI:10.1109/ELNANO50318.2020.9088744

URL: https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85086312564&origin=resultslist

8. Anatoly Druzhinin, Igor Ostrovskii, Yuriy Khoverko, Victor Holota, Igor Kogut, Taras Benko. Frequency response in polycrystalline silicon films of SemOI-structures // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020, Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29. 2020. Article number 9088678. P. 551-554.

DOI:10.1109/TCSET49122.2020.235493

URL: https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85086306615&origin=resultslist

9. Volodymyr Hryha, Taras Benko, Stepan Melnychuk, Lesya Nykolaichuk, Ludmyla Hryha, Orest Volynskyi. Development and Modelling of Devices for Squaring Numbers on FPGA //Information technology and computer modeling (ITCM). 2020. P. 163.

10. Когут І.Т. Бенько Т.Г. Грига В.М. Моделювання і дослідження характеристик операційного підсилювача на основі комірок БМК сенсорних мікросистем // Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, моделювання та управління (ISCM). 2020. С. 80-84.

11. Бенько Т.Г. Моделювання і дослідження характеристик операційного підсилювача на основі комірок БМК в середовищі MicroWind для сенсорних мікросистем. //V Міжнародна науково-практична конференція "Актуальні питання сучасної науки". 2020. С. 40.

12. Benko Taras, Novosiadliy Stepan. Thin-film silicon field-effect transistors for sensor microsystems // Impatto dell'innovazione sulla scienza: aspetti fondamentali e applicati. 2020. P. 156-164.

13. Benko Taras, Novosiadliy Stepan, Kohut Igor. Homostructural bipolar transistors for submicron and sensor structures // XI International Scientific and Practical Conference «Perspectives of World Science and Education». 2020. P. 18-24.

14. Benko Taras, Novosiadliy Stepan, Kohut Igor. Homostructural field transistor on gallium arsenide for sensor microsystems // Paradigmatic view on the concept of world science. – 2020. – P. 138-142.

15. Бенько Т.Г. Обмеження вертикальних розмірів і формування шаруватих структур транзисторів для сенсорних мікросистем // Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні,економічні та технічні аспекти становлення».-2020. С.87-90. Конференція

16. Бенько Т.Г. Горизонтальні конфігурації і мінімізація горизонтального розміру субмікронних транзисторів// IV Міжнародна наукова-практична конференція «Наука та технології».2020. С. 87-90.

17. Новосядлий С.П., Бенько Т.Г. Гомоструктурні польові транзистори для сенсорних мікросистем на фосфіді індію // Міжнародна наукова конференція проблеми та перспективи реалізації та впровадження міждисциплінарних наукових досягнень. 2020. С. 52-55.

18. Benko Taras, Kohut Igor, Hryha Volodymyr, Dolishniak Oksana. Recursive devices of binary data sorting devices //XI International Scientific Conference “Functional base of nanoelectronics” 2020. P. 35-39.

19. Котик М.В., Когут І.Т., Бенько Т.Г. Моделювання елементів мікросистем-на-кристалі зі структурами “кремній-на-ізоляторі” для біометричних досліджень // Інформаційні технології та комп’ютерне моделювання. 2019. С. 218. конференція

20. Kogut I.T.,Dovhyi V.V., Benko T.H. Layouts Design Features of Matrix Elements with “Kink-Effect” Control for Microsystems-on-Chip”// XVII International Freik Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems. Ivano-Frankivsk, May 20-25, 2019. P. 283.

21. Kogut I.T., Holota V.I., Benko T.H. The Simulation of Integrated Capasitive SOI Elements for Sensor Microsystem-on-Chip”// XVII international Freik conference on physics and technology of thin films and nanosystems. Ivano-Frankivsk, May 20-25, 2019. P. 284.

22. Новосядлий С.П., Бенько Т.Г., Луковкін В.В. Метод гетерної епітаксії як основа зниження дефектності епі-шарів для сенсорних мікросистем на кристалі // Тридцять друга всеукраїнська практично-пізнавальна конференція "Наукова думка сучасності і майбутнього". Дніпро 2019. С. 14.

23. Taras Benko. Simulation specialized sensor elements for non-invasive electronic biomedical devices.// 56th Confrence of Student’s Scientific Cirles. Krakow, 2019. P. 214.