

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИБОРНЫХ
СТРУКТУР КРЕМНИЕВЫХ МИКРОСТРИПОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

РОЩЕНКО П.С., ЛОВШЕНКО И.Ю., СТЕМПИЦКИЙ В.Р.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

(г. Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Рассматривается применение кремниевых микростриповых детекторов (КМД) в качестве прямых преобразователей ионизирующего излучения при проектировании нового оборудования ядерной медицины [1-4], используемого в однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) и позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ). Новые конструкции позволяют создавать более компактные и нечувствительные к магнитным полям системы в сочетании со сканерами магнитного резонанса в оборудовании ОФЭКТ и ПЭТ. В статье представлены результаты компьютерного моделирования электрических характеристик приборной структуры КМД с учетом воздействия тяжелой заряженной частицы. Посредством отсеивающего эксперимента выявлены наиболее значимые конструктивные параметры и режимы технологических операций формирования приборной структуры КМД, а также определены их значения, обеспечивающие уменьшение временного разрешения более чем на 10%.

Ключевые слова: кремниевый микростриповый детектор, стриповый контакт, моделирование устройства, излучение, эксплуатационные характеристики, оптимизация, одиночное событие, временное разрешение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования выполняются при финансовой поддержке и в рамках решения задач государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (задание 3.1.03).

OPTIMIZATION OF DESIGN PARAMETERS AND MODES OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS FOR FORMATION OF INSTRUMENT STRUCTURES OF SILICON MICROSTRIP DETECTORS

POLINA S. ROSHCENKO, IVAN YU. LOVSHENKO, VICTOR R. STEMPIITSKY

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The use of silicon microstrip detectors (SMD) as direct converters of ionizing radiation in the design of new nuclear medicine equipment [1-4] used in single-photon emission computed tomography (SPECT) and positron emission tomography (PET) is considered. New designs will allow for more compact and insensitive to magnetic fields systems in combination with magnetic resonance scanners in SPECT and PET equipment. The article presents the results of computer modeling of the electrical characteristics of the device structure of the SMD taking into account the effect of a heavy charged particle (HCP). By means of a screening experiment, the most significant design parameters and modes of technological operations for the formation of the device structure of the SMD were identified, and their values

were determined, which ensure a decrease in the time resolution by more than 10%.

Keywords: silicon microstrip detector, strip contact, device simulation, radiation, performance characteristics, optimization, single event upset, the time resolution.

Conflict of interests. The author (-s) declare no conflict of interests.

Gratitude. The research is carried out with financial support and within the framework of solving the problems of the state program of scientific research "Photonics, opto- and microelectronics" (task 3.1.03).

Введение

Компактные полупроводниковые детекторы, способные заменить гамма-камеры, позволяют разрабатывать новые и гибкие конструкции модульных компонентов, используемых в качестве основных блоков для сборки систем визуализации ОФЭКТ и ПЭТ, с возможностью регистрации траектории частиц при клинических исследованиях внутренних органов человека [5]. В настоящее время в некоторых установках ОФЭКТ и ПЭТ используются полупроводниковые пиксельные детекторы Medipix [6, 7], обеспечивающие наилучшую точность определения координаты частицы в детектирующих системах, способные работать в сильных магнитных полях и в жестких радиационных условиях [8].

Принцип работы пиксельных и микростриповых детекторов заключается в сборе свободных носителей заряда, генерируемых в объеме сенсора в результате ионизационных потерь энергии детектируемой частицы. Задачей КМД является обеспечивать стабильный сигнал при продолжительной работе в условиях высокого радиационного фона [9].

Актуальность работы заключается в исследовании физики устройства КМД, разработке конструктивных решений приборных структур КМД и технологии их формирования; обусловлена необходимостью проектирования координатных детекторов с прямым преобразованием энергии тяжелой заряженной частицы в электрический заряд. Целью работы является исследование физических явлений и конструктивно-технологических факторов, оказывающих наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики приборных структур КМД, а также определении значений этих факторов, обеспечивающих повышение потребительских качеств.

Методика проведения эксперимента

В качестве объекта исследования выбрана приборная структура КМД, представленная на рисунке 1,а [10], а именно элементарная ячейка, включающая три стриповых контакта (СК), расположенных на поверхности кремниевой пластины электронного типа электропроводности толщиной 300 мкм (концентрация примеси равна 10^{16} см^{-3}). Контактные области СК кремниевой пластины легированы акцепторной примесью (10^{18} см^{-3}). На обратной стороне кремниевой пластины находится контакт подложки, с подлегированной областью донорной примеси (10^{18} см^{-3}).

Моделирование эксплуатационных характеристик приборной структуры КМД проведено при напряжении на СК №1-3 $U_{СК} = 0 \text{ В}$, напряжении на подложке $U_{ПОДЛ} = 10 \text{ В}$ и температуре окружающей среды $T = 273 \text{ К}$. Угол между траекторией ТЗЧ с линейной передачей энергии равной $1,81 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, соответствующей ионам азота $^{15}\text{N}^{+4}$ с энергией $E = 1,87 \text{ МэВ}$, и нормалью к поверхности составляет $\lambda = 5,7^\circ$. Точка входа находится на поверхности детектора посередине между стриповыми контактами №2 и №3, а точка выхода на обратной стороне подложки и смещена в сторону стрипового контакта №2.

Для оптимизации приборной структуры КМД необходимо определить параметры, которые оказывают наибольшее влияние на её эксплуатационные характеристики, посредством отсеивающего эксперимента по плану Плакетта-Бермана с использованием матрицы Адамара [11]. Формируется список факторов, влияние которых на характеристики приборной структуры КМД будет оцениваться. Все факторы варьируются на двух уровнях (максимальное и минимальное значение параметра) с одинаковым разбросом значений относительно номинального. Уровни факторов в отсеивающем эксперименте выбираются так, чтобы матрица планирования обладала следующими свойствами: сумма

чисел в каждом столбце равна нулю и сумма произведений элементов, относящихся к одному наблюдению, для двух любых столбцов тоже равна нулю [12].

Входными факторами, влияющими на временное разрешение, выбраны: концентрация доноров в области контакта с подложкой (фактор $X1$); концентрация акцепторов (фактор $X2$); концентрация примеси в объеме (фактор $X3$); толщина подложки (фактор $X4$); толщина СК (фактор $X5$); толщина оксида (фактор $X6$); глубина залегания p - n -перехода (фактор $X7$); глубина имплантации примеси в области контакта к подложке (фактор $X8$); ширина СК (фактор $X9$); расстояние между СК (фактор $X10$). Выходной характеристикой при проведении отсеивающего эксперимента является временное разрешение (Y). На рисунке 1 представлены пояснение к выбранным факторам и матрица для отсеивающего эксперимента.

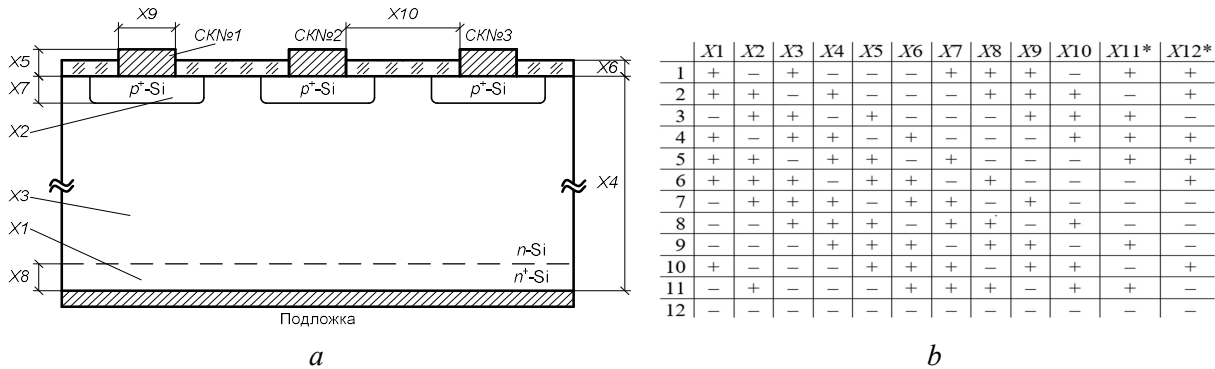


Рис. 1. Приборная структура КМД с обозначенными факторами (a) и матрица 12-ти- факторного эксперимента (b)

Fig. 1. Instrumental structure of SMD with indicated factors (a) and matrix of 12-factor experiment (b)

Результаты

В ходе эксперимента установлено, что выходными конструктивно-технологическими параметрами, оказывающими наибольшее влияние на временное разрешение, являются: толщина подложки (фактор $X4$); ширина СК (фактор $X9$); расстояние между СК (фактор $X10$).

На рисунках 2 и 3 изображены зависимости временного разрешения при изменении величины наиболее значимых факторов, а также представлены аппроксимирующие уравнения с соответствующими величинами достоверности аппроксимации R^2 .

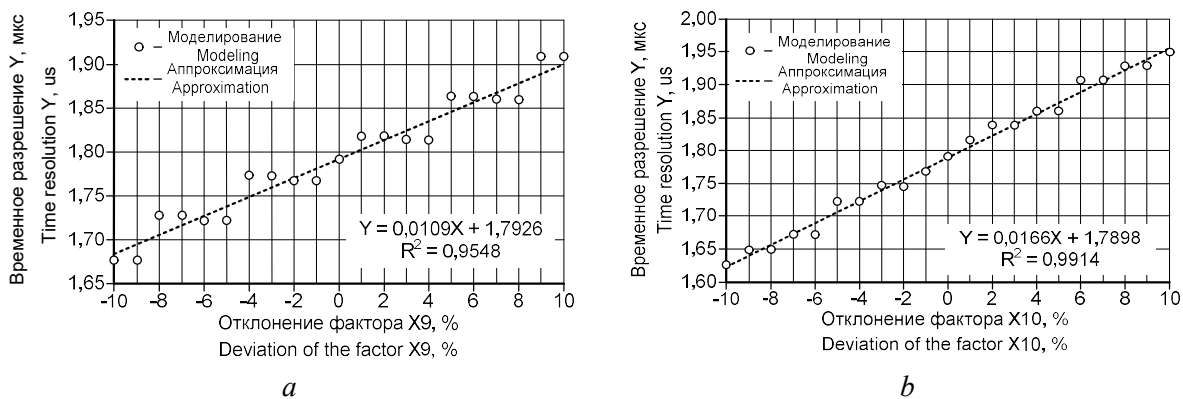


Рис. 2. Зависимость временного разрешения от отклонения факторов: a – фактор $X9$; b – фактор $X10$

Fig. 2. The dependence of the time resolution on the deviation of factors: a – factor $X9$; b – factor $X10$

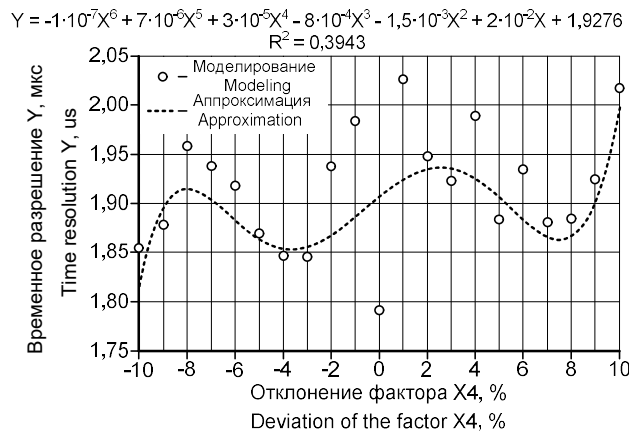


Рис. 3. Зависимость временного разрешения от отклонения фактора X4
Fig. 3. The dependence of the time resolution on the deviation of the factor X4

На основе полученных данных можно сделать вывод о линейной зависимости временного разрешения от ширины СК X9 и расстояния между СК X10. Влияние параметра толщины подложки X4 на величину временного разрешения носит более сложный характер.

Процедура оптимизации конструктивно-технологических параметров приборной структуры КМД сводилась к математической задаче определения величин значимых входных факторов (X4, X9, X10) в диапазоне значений от 0,9 до 1,1 по отношению к номинальному значению, обеспечивающих уменьшение временного разрешения на 10% по отношению к номинальному. В результате оптимизационных расчетов с использованием модифицированного алгоритма Маркара-Левенберга (*Modified Levenberg-Marquart*) [12], реализованного в программном пакете *Optimizer*, для построения поверхности отклика, описывающей зависимость между входными параметрами и выходной характеристикой в итерационном процессе, получены значения конструктивно-технологических параметров, представленные в таблице 1. Величина временного разрешения уменьшена на 277 нс, что составляет 15,5% от номинального значения. При этом максимальное уменьшение значения токов через СК №1–3 наблюдается для СК №2 и составляет 0,95% (со значения 2,63 мкА до 2,38 мкА).

Таблица 1. Результаты моделирования эксплуатационных характеристик приборной структуры КМД после отсеивающего эксперимента

Table 1. Results of modeling the operational characteristics of the instrumental structure of the SMD after the screening experiment

Описание структуры Description of the structure	Параметр Parameter	Значение Value
Факторы: X1 = 1·10 ¹⁸ см ⁻³ X2 = 1·10 ¹⁸ см ⁻³ X3 = 1·10 ¹⁶ см ⁻³ X4 = 300 мкм X5 = 1 мкм X6 = 1 мкм X7 = 0,5 мкм X8 = 0,5 мкм X9 = 10,8 мкм X10 = 16,2 мкм	Номинальное значение тока СК №1, А	9,22782·10 ⁻¹⁵
	Ток СК №1, А	2,64974·10 ⁻⁷
	Время восстановления номинального значения тока СК №1, с	9,26072·10 ⁻⁴
	Номинальное значение тока СК №2, А	8,47192·10 ⁻¹⁵
	Ток СК №2, А	2,62941·10 ⁻⁶
	Время восстановления номинального значения тока СК №2, с	9,13486·10 ⁻⁴
	Номинальное значение тока СК №3, А	9,19336·10 ⁻¹⁵
	Ток СК №3, А	1,9815·10 ⁻⁶
	Время восстановления номинального значения тока СК №3, с	9,09158·10 ⁻⁴

На рисунке 4 представлены зависимости тока через СК №1–3 от времени для структуры с номинальными (пунктирная кривая) и оптимизированными (сплошная кривая) значениями параметров.

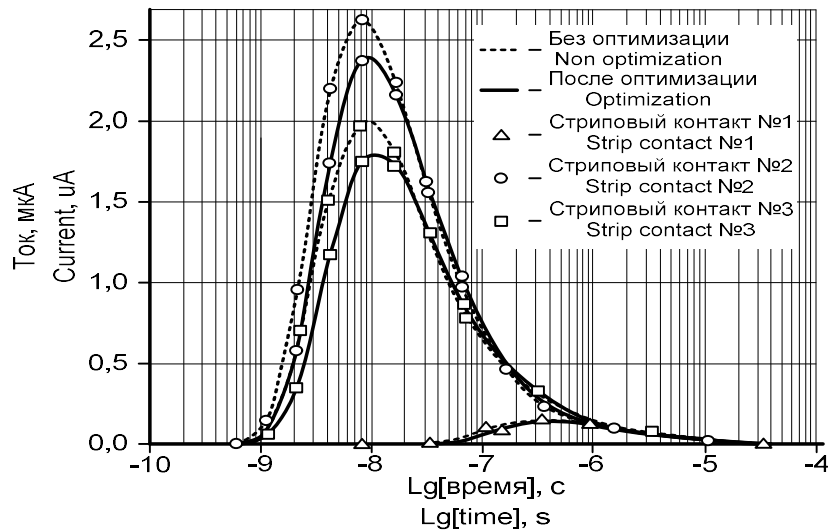


Рис. 4. Зависимость тока через СК от времени для структуры с номинальными (пунктирная кривая) и оптимизированными (сплошная кривая) значениями параметров

Fig. 4. Dependence of the current through the SC on time for a structure with nominal (dotted curve) and optimized (solid curve) parameter values

Заключение

Представлены результаты проведения отсеивающего эксперимента для определения конструктивно-технологических параметров, оказывающих наибольшее влияние на временное разрешение КМД. Такими параметрами являются толщина подложки (фактор X_4), ширина СК (фактор X_9) и расстояние между СК (фактор X_{10}). В результате оптимизационных расчётов, с использованием модифицированного алгоритма Маркара-Левенберга, получены значения этих параметров, обеспечивающих уменьшение величины временного разрешения на 15,5% от номинального значения.

Список литературы

1. Braga, L.H.C., L. Pancheri, L. Gasparini et al. 2011. A CMOS mini-SiPM detector with in-pixel data compression for PET applications. In The 2011 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC), Valencia, Spain, pp. 548–552
2. Cassen, B., L. Curtis, and C.W. Reed. 1950. A sensitive directional gamma-ray detector. *Nucleonics* 6:78–81.
3. Peterson, T.E., D.W. Wilson, and H.H. Barrett. 2003. Application of silicon strip detectors to small-animal imaging. *Nucl. Instrum. Methods A* 505:608–611.
4. Siewerdsen, J.H. et al., The influence of antiscatter grids on soft-tissue detectability in cone-beam computed tomography with flat-panel detectors. *Med. Phys.*, 2004;31(12):3506–3520
5. Knoll, Glenn F. *Radiation detection and measurement* / Glenn F. Knoll. – 1999. – 802 p.
6. Choong, W.S., W.W. Moses, C.S. Tindall et al. 2005. Design for a high-resolution smallanimal SPECT system using pixellated Si(Li) detectors for in vivo I-125 imaging. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 52:174–180.
7. Korn, A. et al., Investigation of charge carrier transport and charge sharing in X-ray semiconductor pixel detectors such as Medipix2. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, 2007;A576:239–242
8. Меркин, М.М. Разработка, создание и применение кремниевых детекторов в физике высоких энергий и физике космических лучей : автореферат / М.М. Меркин – М. : МГУ, 2012. – 285 с.
9. J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Fraden Corp.San Diego, CA, USA: Springer, 2016, 758 p.
10. Родионов, Ю.А. Микроэлектронные датчики и сенсорные устройства : учеб. пособие / Ю. А. Родионов. – Минск : БГУИР, 2019. – 300 с.
11. Короткова, Н. А. Оптимизация параметров кремниевых микростриповых детекторов : автореферат / Н. А. Короткова – М. : МГУ, 2006. – 141 с.
12. Hartman, K. *Statistische Versuchsplanung und -auswertung in der Stoffwirtschaft* / K. Hartman, E. Lezki, W. Schafer. – Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1974. – 439 s.

References

1. Braga, L.H.C., L. Panheri, L. Gasparini et al. 2011. A CMOS mini-SiPM detector with in-pixel data compression for PET applications. In The 2011 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC), Valencia, Spain, pp. 548–552
2. Cassen, B., L. Curtis, and C.W. Reed. 1950. A sensitive directional gamma-ray detector. *Nucleonics* 6:78–81.
3. Peterson, T.E., D.W. Wilson, and H.H. Barrett. 2003. Application of silicon strip detectors to small-animal imaging. *Nucl. Instrum. Methods A* 505:608–611.
4. Siewerdsen, J.H. et al., The influence of antiscatter grids on soft-tissue detectability in cone-beam computed tomography with flat-panel detectors. *Med. Phys.*, 2004;31(12):3506–3520
5. G. F. Knoll, Radiation detection and measurement. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2010, 864 p.
6. Choong, W.S., W.W. Moses, C.S. Tindall et al. 2005. Design for a high-resolution smallanimal SPECT system using pixellated Si(Li) detectors for in vivo I-125 imaging. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 52:174–180.
7. Korn, A. et al., Investigation of charge carrier transport and charge sharing in X-ray semiconductor pixel detectors such as Medipix2. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, 2007;A576:239–242
8. M. Merkin, “Razrabotka, sozдание i primeneniye kremnievyykh detektorov v fizike vysokikh energiy i fizike kosmicheskikh luchey : avtoreferat,” Moscow: MGU, 2012, 285 p. [in Russian]
9. J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. Fraden Corp. San Diego, CA, USA: Springer, 2016, 758 p.
10. Yu. A. Rodionov, “Mikroelektronnyye datchiki i sensornyye ustrojstva: ucheb. posobie,” Minsk: BSUIR, 2019, 300 p. [in Russian]
11. N. A. Korotkova, “Optimizatsiya parametrov kremnievyykh mikrostripovyykh detektorov: avtoreferat,” Moscow: MGU, 2006, 141 p. [in Russian]
12. K. Hartman, E. Lezki, W. Schafer, “Statistische Versuchsplanung und -auswertung in der Stoffwirtschaft,” Leipzig : VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, 1974, 439 p.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors contribution

All authors equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Рощенко П. С., инженер-электроник научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР).

Ловшенко И. Ю., зав. научно-исследовательской лабораторией «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» научно-исследовательской части БГУИР.

Стемпичский В. Р., канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника научно-исследовательской части, научный руководитель лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» научно-исследовательской части БГУИР.

Information about the authors

Roshchenko P. S., Electronic Engineer, Research Laboratory «CAD in Micro- and Nanoelectronics» of the research department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR).

Lovshenko I. Yu., Head of the Research Laboratory «CAD in Micro- and Nanoelectronics» of the research department of the BSUIR.

Stempitsky V. R., Ph.D., Associate Professor, Deputy Head of Research and Development Department Sc. Adviser of «CAD in Micro- and Nanoelectronics» of the research department of the BSUIR.

Адрес для корреспонденции

220045, Беларусь
Минск, П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Address for correspondence

220045, Belarus
Minsk, P. Brovki, 6
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

МЕДЭЛЕКТРОНИКА–2020. СРЕДСТВА МЕДИЦИНСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И НОВЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

тел. +375(17)2938409;

e-mail: lovshenko@bsuir.by

Ловшенко Иван Юрьевич

tel. +375(17)2938409;

e-mail: lovshenko@bsuir.by

Lovshenko Ivan Yurievich