

УДК 621.384.3

DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_1\\_58\\_79](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_79)  
EDN: FUIQSP**ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА СЧИТЫВАНИЯ ДАННЫХ С НЕОХЛАЖДАЕМЫХ  
ТЕПЛОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ БОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА****Чан Ван Чиеу, Дао Динь Ха, П.Э. Новиков, К.В. Корсак,  
И.Ю. Ловшенко, В.Р. Стемпицкий***Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск***READOUT INTEGRATED CIRCUIT OF THERMAL UNCOOLED  
BOLOMETRIC TYPE DETECTORS****Tran Van Trieu, Dao Dinh Ha, P.E. Novikov, K.V. Korsak,  
I.Yu. Lovshenko, V.R. Stempitsky***Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*

**Аннотация.** Важной задачей в области проектирования сенсорных устройств, в т. ч. в области термографии, является разработка систем, обеспечивающих точную обработку входных данных, а также их преобразование в цифровой сигнал. Представлены результаты применения реализованной на языке описания аппаратуры Verilog-A обобщенной электрической (компактной) модели неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа (микроболометр), учитывающей особенности конструкции и используемых для его изготовления материалов, при проектировании схемотехнического и топологического решений интегральной схемы считывания данных с матрицы детекторов, расположенных в фокальной плоскости, с использованием библиотеки проектирования TSMC 0,18 мкм.

**Ключевые слова:** неохлаждаемый тепловой детектор болометрического типа, микроболометр, инфракрасный детектор, оксид ванадия, матрица в фокальной плоскости, интегральная схема считывания, моделирование.

**Для цитирования:** Интегральная схема считывания данных с неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа / Чан Ван Чиеу, Дао Динь Ха, П.Э. Новиков, К.В. Корсак, И.Ю. Ловшенко, В.Р. Стемпицкий // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 1 (58). – С. 79–85. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_1\\_58\\_79](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_79). – EDN: FUIQSP

**Abstract.** An important task in the design of sensor devices, including thermography, is the development of systems that provide accurate processing of input data, as well as their conversion into a digital signal. The results of application of the generalized electrical (compact) model of the thermal uncooled detector bolometric type (microbolometer) implemented in the Verilog-A hardware description language, which takes into account the peculiarities of the design and materials used for its fabrication, in the design of circuit and topological solutions of the integrated circuit for reading data from a matrix of detectors located in the focal plane, using the TSMC 0.18 μm design library, are presented.

**Keywords:** uncooled thermal detector of bolometric type, microbolometer, infrared detector, vanadium oxide, matrix in the focal plane, readout integral circuit, modeling.

**For citation:** Readout integrated circuit of thermal uncooled bolometric type detectors / Tran Van Trieu, Dao Dinh Ha, P.E. Novikov, K.V. Korsak, I.Yu. Lovshenko, V.R. Stempitsky // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 1 (58). – P. 79–85. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_1\\_58\\_79](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_79) (in Russian). – EDN: FUIQSP

**Введение**

Технологии визуализации инфракрасного спектра, появившиеся в 1950-х годах, позволяют видеть объекты, недоступные человеческому глазу, обнаруживать тепловую энергию или излучаемое объектами тепло. За последнее время тепловые детекторы и системы на их основе (тепловизоры) стали более доступнее для потребителей за счет снижению стоимости и улучшению эксплуатационных характеристик. Это позволило расширить области применения термографии: теперь кроме специального назначения и научных исследованиях тепловизоры стали применять для обследования электрооборудования, поиска утечек тепла, газа, нефти, автоматизации

технологических процессов и мониторинга окружающей среды, построения систем технического зрения [1].

Двумя основными компонентами систем тепловизоров являются матрица в фокальной плоскости (МФП, англ. FPA – Focal Plane Array) и интегральная схема считывания (ИСС, англ. ROIC – Readout Integral Circuit). На рисунке 0.1 изображена общая структурная схема преобразования ИК-излучения в видеопоследовательность.

МФП состоит из массива чувствительных к ИК-диапазону пикселей (микроболометров), расположенных в фокальной плоскости линзы. Существует два основных типа ИК-пикселей: тепловые и фотонные [2].

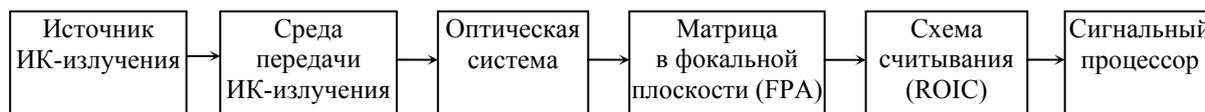


Рисунок 0.1 – Преобразование ИК-излучения в цифровой сигнал

Время отклика и чувствительность фотонных детекторов намного выше, чем у тепловых. Однако, для их функционирования с наилучшим соотношением сигнал / шум их необходимо охлаждать и поддерживать постоянную температуру. Обычно применяется криогенное охлаждение Дьюара с использованием жидкого азота, термоэлектрическое охлаждение, охлаждение Джоуля-Томсона и газациркуляционное охлаждение. Все эти способы приводят к усложнению эксплуатации и обслуживания, увеличению стоимости и энергопотребления [3].

Тепловые детекторы ИК-излучения основаны на термоэлектрическом эффекте (термопары), тепловом расширении (ячейки Голея) или изменении сопротивления (микроболометры). Для увеличения чувствительности в микроболометре в качестве термочувствительного слоя применяется материал с очень малой теплоемкостью и большим температурным коэффициентом сопротивления [4].

ИСС представляет собой интерфейс между МФП и блоком обработки сигналов и выполняет функции интеграции, усиления и мультиплексирования слабых зарядов детектора.

Малый ток, индуцированный ИК-излучением, интегрируется и отбирается в соответствующей элементарной ячейке. Затем выходные данные элементарных ячеек считываются построчно и преобразуются в последовательный поток битов с помощью схемы управления. Этот последовательный поток затем передается в процессор для постобработки и сглаживания.

Качество систем построения ИК-изображения зависит от характеристик МФП и ИСС. Одной из наиболее важных характеристик ИК-детекторов является обнаруживающая способность  $D^*$  – фоточувствительность на единицу активной площади детектора, позволяющая сравнивать разные детекторы между собой. Шум может исходить от фоновых колебаний, рабочих цепей или самого ИК-детектора. Фоновый шум доминирует над двумя другими типами шума, а также накладывает теоретический предел на  $D^*$  (т. н. фоновое ограничение детектора) [5].

### 1 Приборная структура

В качестве приборной структуры использована конструкция микроболометра, представляющая собой резонатор Фабри-Перо [6] и состоящая из многослойной мембраны, расположенной на расстоянии  $D$  (вакуумный зазор) от кремниевой подложки с нанесенным слоем отражающего покрытия (Al). Мембрана состоит из пленок проводящего и поглощающего (NiCr), диэлектрического ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) и термочувствительного ( $\text{VO}_x$ ) материалов (рисунок 1.1, отражающий слой не показан). Воздушный зазор обеспечивается за счет опорных «ног», которые также являются контактами микроболометра.

Посредством компьютерного моделирования установлены оптимальные с точки зрения обеспечения наибольшей величины и равномерности коэффициента поглощения в диапазоне длин волн  $\lambda$  от 8 до 14 мкм: нижний слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – 70 нм; NiCr – 4 нм; средний слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – 200 нм;

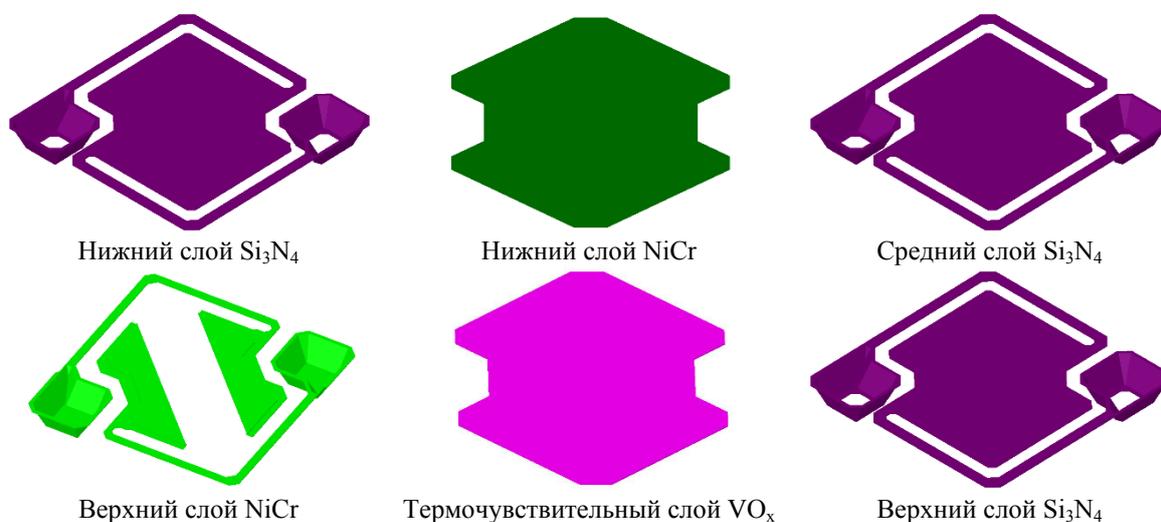


Рисунок 1.1 – Конструктивные слои микроболометра

термочувствительный слой  $\text{VO}_x$  – 250 нм; верхний слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – 150 нм. При этом величина среднего коэффициента поглощения составляет 0,86 о.е., а пиковое значение – 0,9991 о.е. (при  $\lambda = 8,9$  мкм).

Исследование эксплуатационных характеристик микроболометра (определены зависимости температуры от напряжения, электрического сопротивления от температуры, временные диаграммы с профилем падающего излучения, в виде теплового потока, а также приложенного напряжения и т.д.) выполнено посредством применения термомеханического, электротермомеханического и стационарного теплового анализов.

## 2 Разработка компактной (электрической) модели

На языке описания аппаратуры Verilog-A реализована компактная модель микроболометра. Модель содержит блок расчета выходного напряжения в зависимости от входного сигнала  $V$  и теплового потока (ИК-излучения). В модели реализован блок ожидания изменения напряжения на микроболометре и/или величины теплового потока, а также определения процесса, который будет запущен в результате наступления такого события (нагрев или остывание приборной структуры). Реальная температура болометра определяется как сумма номинальной температуры и ее приращения в зависимости от приложенного напряжения  $\Delta T_1$  и теплового потока  $\Delta T_2$  по выражению

$$T_{real} = T_{nom} + \Delta T_1 + \Delta T_2.$$

Вклад каждой составляющей рассчитывается исходя из устоявшегося режима работы

болометра при пропускании постоянного тока. Так, максимальное значение приращения температуры при протекании тока через болометр  $dT_{1\max}$  определяется как

$$dT_{1\max} = f_1(V) - f_2(V),$$

где  $f_1(V)$  и  $f_2(V)$  – функции, аппроксимирующие зависимость приращения температуры от приложенного напряжения, полученную в результате приборного моделирования, и ее остаточного члена (рисунок 2.1).

Максимальное значение приращения температуры при воздействии теплового потока  $dT_{2\max}$  имеет линейную зависимость от величины теплового потока (рисунок 2.2).

Величина сопротивления микроболометра рассчитывается по аппроксимирующей функции зависимости, полученной при анализе результатов приборного моделирования (рисунок 2.3).

Для учета динамических изменений введены функции зависимости нагрева и остывания микроболометра от временного шага для эффекта самонагрева и поглощения тепла от внешнего источника  $f_1, f_2, f_3$  и  $f_4$  соответственно. Функции рассчитываются по аппроксимационным зависимостям, полученным на основе временных диаграмм в программном продукте приборного моделирования. На каждом временном шаге происходит определение текущего изменения температуры в зависимости от предыдущего временного шага.

На рисунке 2.4 представлено сравнение результатом моделирования в программных продуктах приборного и схемотехнического моделирования.

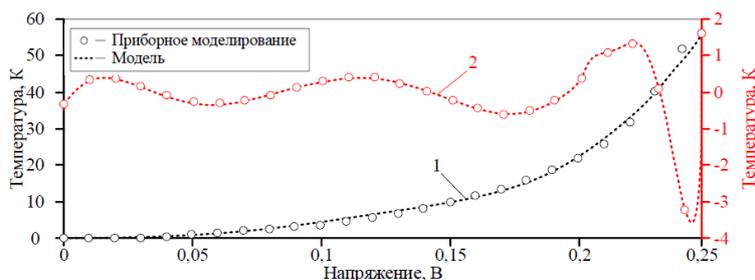


Рисунок 2.1 – Зависимость приращения температуры от приложенного напряжения (1) и разницы её величины со значениями функции её аппроксимирующей (2)

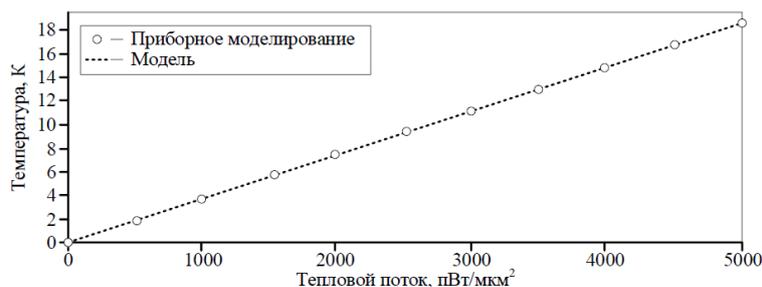


Рисунок 2.2 – Зависимость приращения температуры от теплового потока

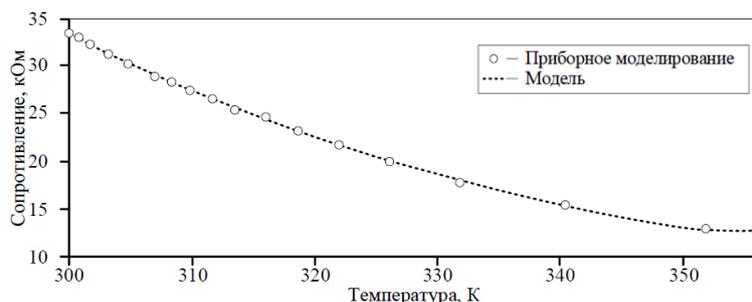


Рисунок 2.3 – Зависимость величины сопротивления от температуры микроболметра

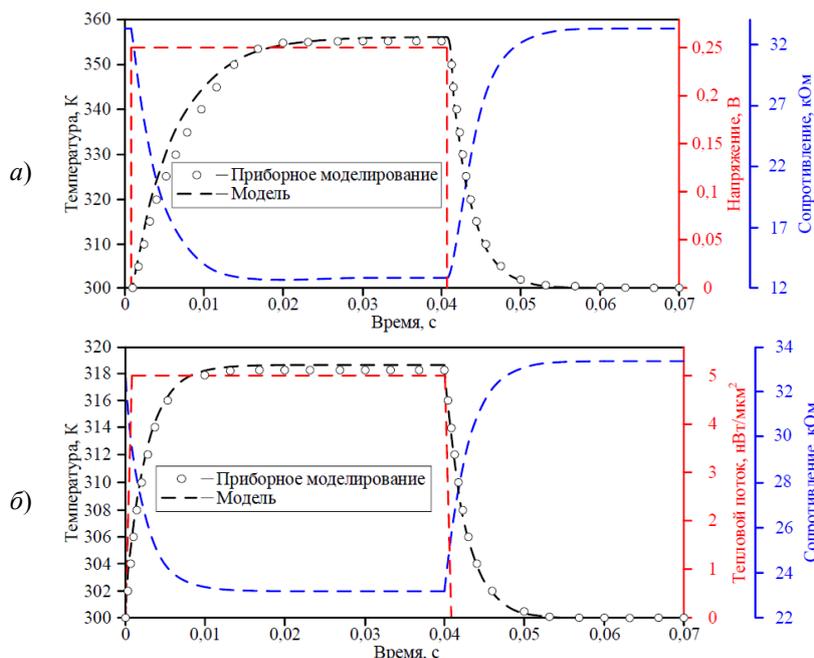


Рисунок 2.4 – Сравнение результатов моделирования при подаче импульса считывания (а) и воздействии теплового потока (б)

### 3 Реализация схемы считывания

Представление массива неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа со схемой считывания, реализованной посредством оптического разделения эталонного и активного пикселя, показана на рисунке 3.1. Буквой *S* обозначены ключевые переключатели, реализованные по КМОП-технологии.

Изменение сопротивления микроболметра, связанное с эффектом самонагрева, намного больше вызванного воздействием теплового потока (ИК-излучения). Для компенсации такого эффекта применяют полумостовые схемы резистивного делителя: постоянная часть тока детектора компенсируется с помощью эталонного микроболметра, располагающегося в защищенном от ИК-излучения месте на подложке.

Трансимпедансный усилитель (ТИУ) является основным каскадом усиления в схеме и предназначен для преобразования токового сигнала, генерируемого датчиком, в сигнал напряжения, который можно обрабатывать и анализировать [7]. Он состоит из усилителя и конденсатора

обратной связи. Резистор обратной связи заменен конденсатором обратной связи для достижения емкостного трансимпедансного усиления и стабилизации коэффициента усиления и частотной характеристики схемы. Обычно схема ТИУ также реализует метод интегрирования для преобразования текущего сигнала в напряжение, пропорциональное накопленному заряду. Интегрирующий конденсатор подключается параллельно конденсатору обратной связи, а переключатель используется для сброса напряжения на интегрирующем конденсаторе в начале каждого периода интегрирования. Операция сброса гарантирует, что выходное напряжение будет пропорционально заряду, генерируемому датчиком в течение времени интегрирования. Схема считывания ТИУ имеет ряд преимуществ, включая высокий коэффициент усиления, низкий уровень шума и способность обрабатывать малые сигналы.

Выходной сигнал ТИУ все еще имеет малую амплитуду и обычно требует дополнительного усиления. Для этих целей применяют маломощные усилители [8].

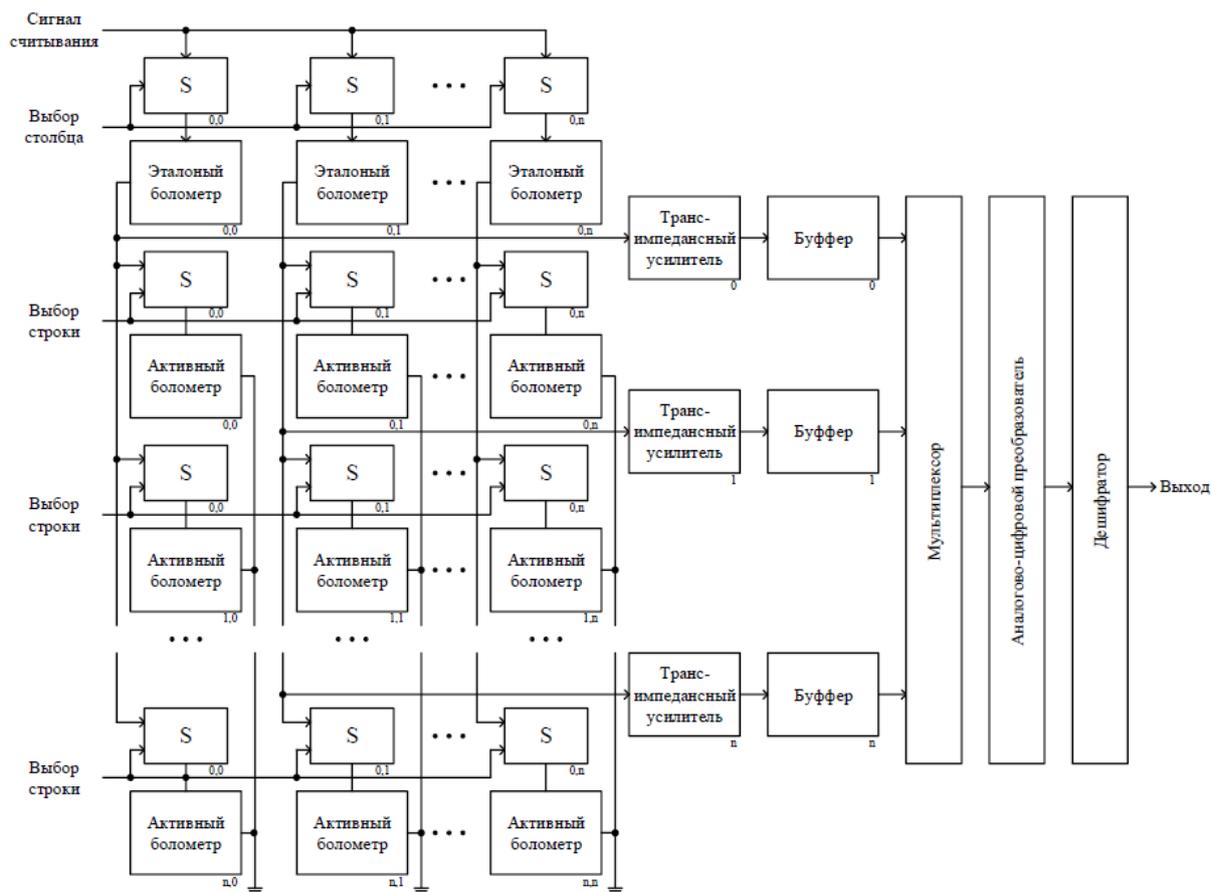


Рисунок 3.1 – Структурная схема теплового детектора, включающего МФП и ИСС

Далее сигнал поступают в схему выборки и хранения (буфер), которая предназначена для запоминания мгновенного значения аналогового сигнала и его хранения в течение времени необходимого для его дальнейшего преобразования.

Для передачи сигналов с каждого столбца МФП на вход АЦП необходимо применение аналогового мультиплексора (коммутатор). Его особенность заключается в формировании электрического соединения выбранного входа с выходом и обеспечении низкого сопротивления между ними. Таким образом сигналы могут передаваться в обе стороны. Выбор желаемого входа осуществляется подачей соответствующей комбинации управляющих сигналов.

Для обеспечения работы с данными, получаемыми от микроболометров, необходимо их дискретизация (выбор значений через равные промежутки времени из непрерывного потока данных), которая выполняется в АЦП [9]. Для реализации выбрана схема параллельного АЦП (Flash АЦП), которые отличаются большим быстродействием. Параллельный  $n$ -разрядный АЦП состоит из  $2n$  резисторов и  $2n - 1$  компараторов. На каждый компаратор подается опорное напряжение, значение которого для соседних точек отличается на величину, соответствующую

одному младшему значащему разряду (более старшие разряды – в верхних по схеме элементах). На выходе  $2n - 1$  компараторов формируется выходной код, называемый «код термометра». В действительности, необходимо преобразовать сигнал при помощи шифратора в  $n$ -разрядный двоичный код.

Для избавления от избыточной информации проведено моделирование одного пикселя. На рисунке 3.2 представлена тестовая схема считывания микроболометра, а на рисунке 3.3 – результат моделирования.

Сигнал out показывает напряжение между активным пикселем микроболометра и эталонным. Уровень напряжения изменяется в зависимости от уровня сигнала net5, который представляет собой тепловой поток. Сигнал AMP является обработанным сигналом out через предусилитель и усилитель. Сигнал b является интегрированным сигналом AMP через блок SH. Выход блока SH соединён со входом в АЦП. Сигналы  $x<0:4>$  являются выходами АЦП.

Для представленной на рисунке 3.1 системы с использованием библиотеки проектирования TSMC 0,18 мкм CMOS MS/RF 1.8/3.3V PDK разработано топологическое представление, которое содержит МФП и ИСС на одном кристалле.

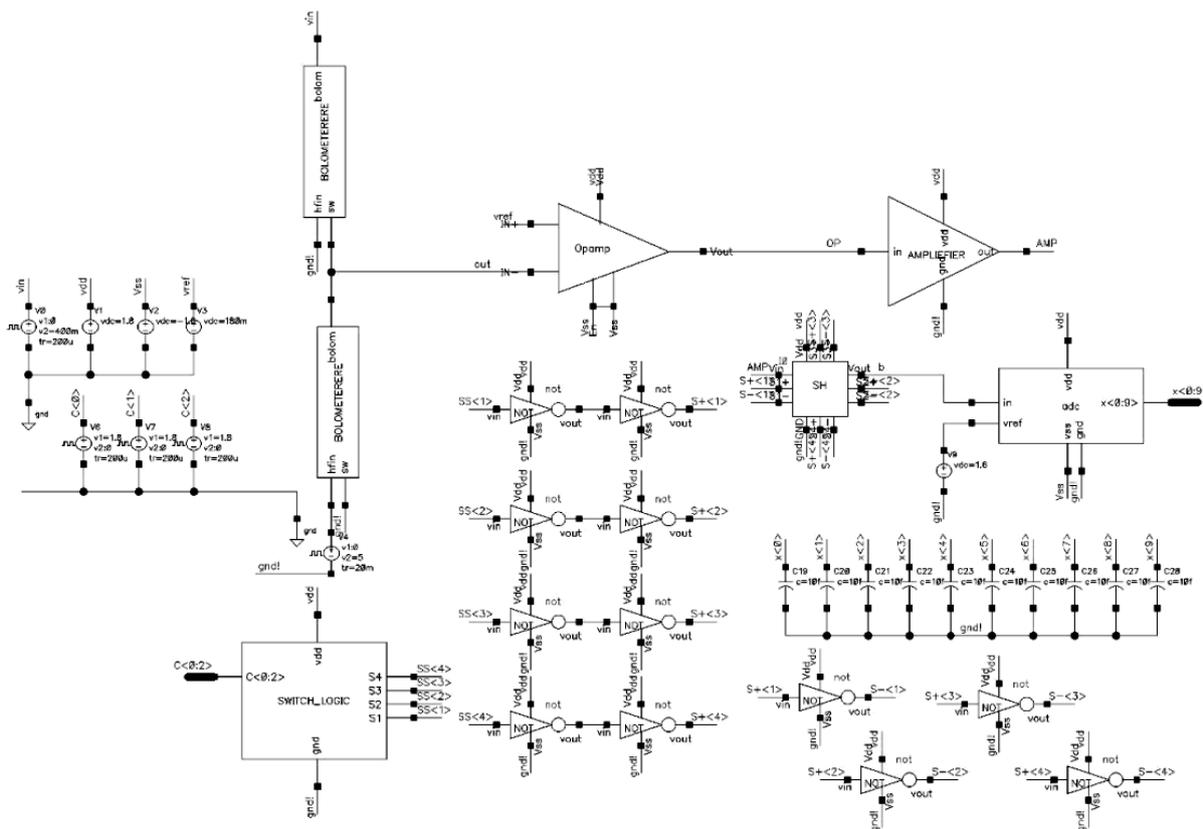


Рисунок 3.2 – Тестовая схема считывания микроболметра

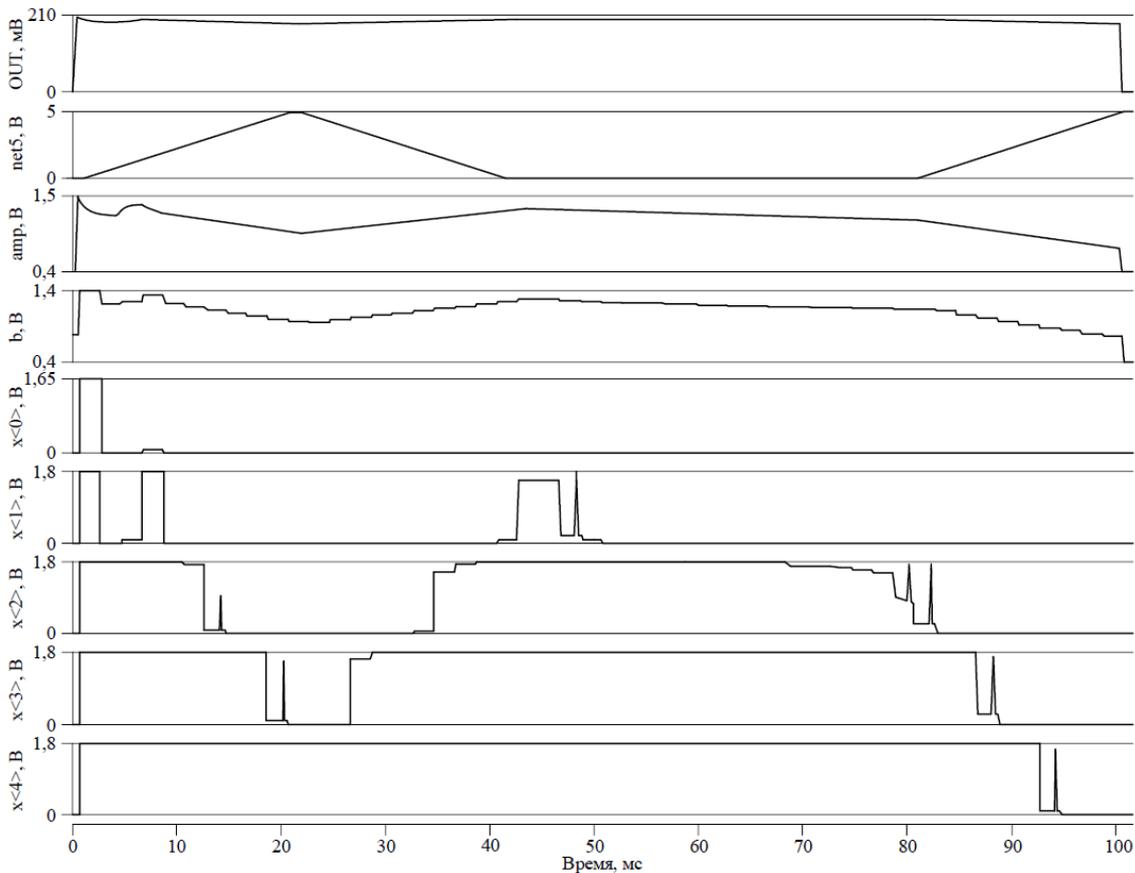


Рисунок 3.3 – Временная диаграмма тестовой схемы считывания микроболметра

Площадь кристалла составляет 20,4 мм<sup>2</sup>. Моделирование электрических характеристик микроболометра осуществлялось с использованием разработанной электрической модели.

Результаты компьютерного моделирования предлагаемой схемы с учетом паразитных компонентов, вносимых топологическим решением, увеличивают задержки переключения на 14%, но при этом не нарушается работоспособность схемотехнического решения.

Данные компьютерного моделирования схемотехнического решения для приема, усиления и обработки данных сенсорных устройств, состоящей из интегрированных на одном кристалле с использованием библиотеки проектирования TSMC 0,18 мкм CMOS MS/RF 1,8/3,3V PDK схемы считывания данных с матрицы микроболометров показали высокую эффективность разработанной электрической модели, а также хорошее соответствие полученных результатов функциональным параметрам компонентов схемы обработки сигналов.

#### Заключение

Проведена интеграция в программный продукт проектирования интегральных микросхем компактной модели неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа, реализованной на языке описания аппаратуры Verilog-A, которая позволяют учитывать при схемотехническом моделировании влияние эффекта самонагрева и внешнее воздействие теплового потока.

В рамках тестирования электрической модели микроболометра в среде программного комплекса схемотехнического моделирования установлено, что погрешность моделирования характеристик исследуемых приборных структур не превышает 1% и 2% по сравнению с результатами приборного моделирования с использованием моделей переноса носителей заряда для статических и динамических характеристик соответственно.

Результаты компьютерного моделирования схемотехнического решения интегральной схемы считывания данных микроболометров с использованием библиотеки проектирования TSMC 0,18 мкм CMOS MS/RF 1,8/3,3V PDK показали высокую эффективность разработанной электрической модели микроболометра, а также хорошее соответствие полученных результатов функциональным параметрам компонентов схемы обработки сигналов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Performance and applications of cooled composite bolometers in the field of ionizing radiation metrology* / N. Coursol [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors

and Associated Equipment. – 1992. – Т. 312. – № 1-2. – С. 24–33.

2. *Rogalski, A. Challenges of small-pixel infrared detectors: a review* / A. Rogalski, P. Martyniuk, M. Kopytko // Reports on Progress in Physics. – 2016. – Т. 79. – № 4. – С. 046501.

3. *Performance and applications of cooled composite bolometers in the field of ionizing radiation metrology* / N. Coursol [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1992. – Vol. 312, № 1-2. – P. 24–33.

4. *Winter, M.R. Oxide materials with low thermal conductivity* / M.R. Winter, D.R. Clarke // Journal of the American Ceramic Society. – 2007. – Т. 90, № 2. – С. 533–540.

5. *Ограничение фоном мощности эквивалентной шуму для приемника одиночных ИК фотонов на основе сверхпроводниковых детекторов, сопряженных с одномодовым волокном* / К.В. Смирнов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 5. – 14 с. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may15/3/text.pdf>. – Дата доступа: 11.09.2023.

6. *Smith, P.W. A Bistable Fabry Perot Resonator* / P.W. Smith, E.H. Turner // Applied Physics Letters. – 1977. – № 30 (6). – С. 280–281.

7. *Transimpedance amplifier for high sensitivity current measurements on nanodevices* / G. Ferrari [et al.] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2009. – Т. 44, № 5. – С. 1609–1616.

8. *CMOS low-noise amplifier design optimization techniques* / T.K. Nguyen [et al.] // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2004. – Т. 52, № 5. – С. 1433–1442.

9. *Matsuzawa, A. Trends in high speed ADC design* / A. Matsuzawa // 2007 7th International Conference on ASIC. – IEEE, 2007. – С. 245–248.

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

Поступила в редакцию 16.01.2024.

#### Информация об авторах

Чан Ван Чиеу – аспирант  
Дао Динь Ха – к.т.н., старший научный сотрудник  
Новиков Павел Эдуардович – инженер-электроник  
Корсак Кирилл Витальевич – мл. научный сотрудник  
Ловиенко Иван Юрьевич – старший преподаватель, магистр технических наук, заведующий лабораторией  
Стелницкий Виктор Романович – к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник