



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-84-91>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.384.3

## ОПТИЧЕСКИЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООВОГО НЕОХЛАЖДАЕМОГО ДЕТЕКТОРА БОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ОКСИДА ВАНАДИЯ

ЧАН ВАН ЧИЕУ<sup>1</sup>, К. В. КОРСАК<sup>1</sup>, П. Э. НОВИКОВ<sup>1</sup>, И. Ю. ЛОВШЕНКО<sup>1</sup>,  
С. М. ЗАВАДСКИЙ<sup>1</sup>, Д. А. ГОЛОСОВ<sup>1</sup>, А. А. СТЕПАНОВ<sup>1</sup>, А. А. ГУБАРЕВИЧ<sup>1</sup>,  
В. В. КОЛОС<sup>2</sup>, Я. А. СОЛОВЬЁВ<sup>2</sup>, Д. С. ЛЕВЧУК<sup>2</sup>, В. Р. СТЕМПИЦКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 04.09.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Определение оптических, механических и электрических характеристик является одним из решающих факторов при проектировании приборных структур тепловых неохлаждаемых детекторов болометрического типа (микроболометров). В статье представлены результаты оптимизационных расчетов посредством компьютерного моделирования спектров поглощения, пропускания и отражения приборных структур микроболометров на основе термочувствительной пленки оксида ванадия методом конечных разностей во временной области (англ. finite-difference time-domain, FDTD). Выполнена проверка на соответствие характеристик исследуемой структуры микроболометра механическим и электрическим требованиям, предъявляемым к данному классу приборов.

**Ключевые слова:** неохлаждаемый тепловой детектор болометрического типа, микроболометр, инфракрасный детектор, LWIR, характеристики, оксид ванадия, моделирование.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Исследования выполнены в рамках решения задач задания 3.3 Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций».

**Для цитирования.** Оптические, механические и электрические характеристики теплового неохлаждаемого детектора болометрического типа на основе оксида ванадия / Чан Ван Чиеу [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 84–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-84-91>.

## OPTICAL, MECHANICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THERMAL UNCOOLED BOLOMETRIC TYPE DETECTOR BASED ON VANADIUM OXIDE

TRAN VAN TRIEU<sup>1</sup>, KIRYL V. KORSAK<sup>1</sup>, PAVEL E. NOVIKOV<sup>1</sup>, IVAN YU. LOVSHENKO<sup>1</sup>,  
SERGEY M. ZAVADSKI<sup>1</sup>, DZMITRY A. GOLOSOV<sup>1</sup>, ANDREY A. STEPANOV<sup>1</sup>,  
ALIAKSANDR A. HUBAREVICH<sup>1</sup>, VLADIMIR V. KOLOS<sup>2</sup>, YAROSLAV A. SOLOVJOV<sup>2</sup>,  
DZMITRY S. LIAUCHUK<sup>2</sup>, VIKTOR R. STEMPITSKY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)  
<sup>2</sup>JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 04.09.2023

**Abstract.** Determination of optical, mechanical and electrical characteristics is one of the decisive factors in the design of instrumentation structures of thermal uncooled bolometer-type detectors (microbolometers). The paper

presents the results of optimization calculations by means of computer simulation of absorption, transmittance and reflection spectra of device structures of microbolometers based on thermosensitive vanadium oxide film by finite-difference time-domain method (FDTD). The characteristics of the investigated microbolometer structure were checked for compliance with mechanical and electrical requirements for this class of devices.

**Keywords:** uncooled bolometric type thermal detector, microbolometer, infrared detector, LWIR, characterization, vanadium oxide, modeling.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The research was carried out within the framework of solving the tasks of task 3.3 of the State Research Program “Photonics and Electronics for Innovations”.

**Для цитирования.** Tran Van Trieu, Korsak K. V., Novikov P. E., Lovshenko I. Yu., Zavadski S. M., Golosov D. A., Stepanov A. A., Hubarevich A. A., Kolos V. V., Solovjov Ya. A., Liauchuk D. S., Stempitsky V. R. (2023) Optical, Mechanical and Electrical Characteristics of Thermal Uncooled Bolometric Type Detector Based on Vanadium Oxide. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 84–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-84-91> (in Russian).

## Введение

Инфракрасные детекторы (ИК-детекторы) находят применение в широком спектре приложений, таких как военная, космическая, газовая промышленность, системы безопасности, медицинское оборудование. Обычно [1] работа детекторов обеспечивается в одной из двух областей электромагнитного спектра: длинноволновой (LWIR, длина волны  $\lambda$  от 8 до 14 мкм) и средневолновой (MWIR, от 3 до 5 мкм) инфракрасной. Однако большинство распространенных ИК-детекторов способны работать только при комнатной температуре (для работы при высоких температурах необходимо охлаждение, что приводит к повышению стоимости конечного устройства). Неохлаждаемый тепловой детектор болометрического типа (микроболومتر) по сравнению с другими типами ИК-детекторов обладает такими преимуществами, как низкая стоимость, малый вес и хорошая портативность.

В качестве термочувствительного слоя в микроболометрах находят применение как новые материалы (углеродные нанотрубки,  $\text{TiO}_{2-x}$ ), так и традиционные –  $\alpha\text{-Si}$  и  $\text{VO}_x$  [2].  $\text{VO}_x$  отличается малым температурным коэффициентом (до 5 %) и соответственно расширенным температурным диапазоном применения (от  $(-40)$  до  $60$  °C), повышенной чувствительностью (от  $3,04 \cdot 10^3$  до  $1,14 \cdot 10^3$  В/Вт при комнатной температуре и от  $9,54 \cdot 10^2$  до  $3,02 \cdot 10^2$  В/Вт даже при  $120$  °C с повышением температуры формирования пленки [3]).

Ключевыми параметрами микроболометров являются коэффициент поглощения и спектральная чувствительность, которая определяется как отношение изменения сигнала на выходе к потоку монохроматического излучения, вызвавшего это изменение. Следует отметить, что определение оптимальных значений геометрических параметров микроболометра составляет основную задачу проектировщика. Метод конечных разностей во временной области (англ. finite-difference time-domain, FDTD) является эффективным подходом к решению уравнений Максвелла, который позволяет с приемлемой точностью осуществлять полноволновой анализ электромагнитных полей в неоднородных многослойных структурах [4], в частности, моделировать оптические параметры поглощения, пропускания и отражения во всем исследуемом спектре за один расчет, что значительно сокращает длительность моделирования, необходимого для получения оптимизированной структуры.

Учет влияния механических напряжений, обусловленных особенностями технологического процесса формирования приборной структуры микроболометра, а также изменением температурных режимов его эксплуатации, – важен при точной оценке эффективности и чувствительности детектора. Для описания поведения микроэлектромеханических систем применяются различные подходы: (i) аналитические, (ii) с помощью поведенческих моделей (ROM), (iii) с использованием дискретной модели на основе конечных элементов, (iv), а также сочетание нескольких способов описания. Модули CoventorWare и CoventorMP, входящие в состав программного комплекса компании Coventor, позволяют описывать приборную структуру микроболометра, задавать параметры исходных материалов и выполнять моделирование эксплуатационных характеристик болометра, учитывающего влияние внутренних механических напряжений и механических на-

пряжений, вызванных внешним воздействием. Важной особенностью является возможность интегрирования результатов моделирования приборных структур в большинство программных продуктов для дальнейшего анализа (MATLAB, Cadence Virtuoso, MathWorks Simulink).

Таким образом, цель проводимых исследований – определение значений конструктивных параметров микроболметра, сформированного на основе термочувствительной пленки  $VO_x$ , которые позволяют обеспечить наибольшую величину поглощения ИК-излучения в LWIR-диапазоне, а также проверка требований к механической прочности и электрическим характеристикам исследуемой структуры микроболметра.

### Оптимизация оптических параметров микроболметра

Базовая структура микроболметра представляет собой резонатор Фабри–Перо [5], состоящий из многослойной мембраны, расположенной на расстоянии  $D$  (воздушный или вакуумный зазор) от кремниевой подложки с нанесенным слоем отражающего покрытия (Al). Мембрана состоит из пленок проводящего и поглощающего (NiCr), диэлектрического ( $Si_3N_4$ ) и термочувствительного ( $VO_x$ ) материалов (рис. 1, отражающий слой не показан). Воздушный зазор обеспечивается за счет опорных «ног», которые также являются контактами микроболметра.

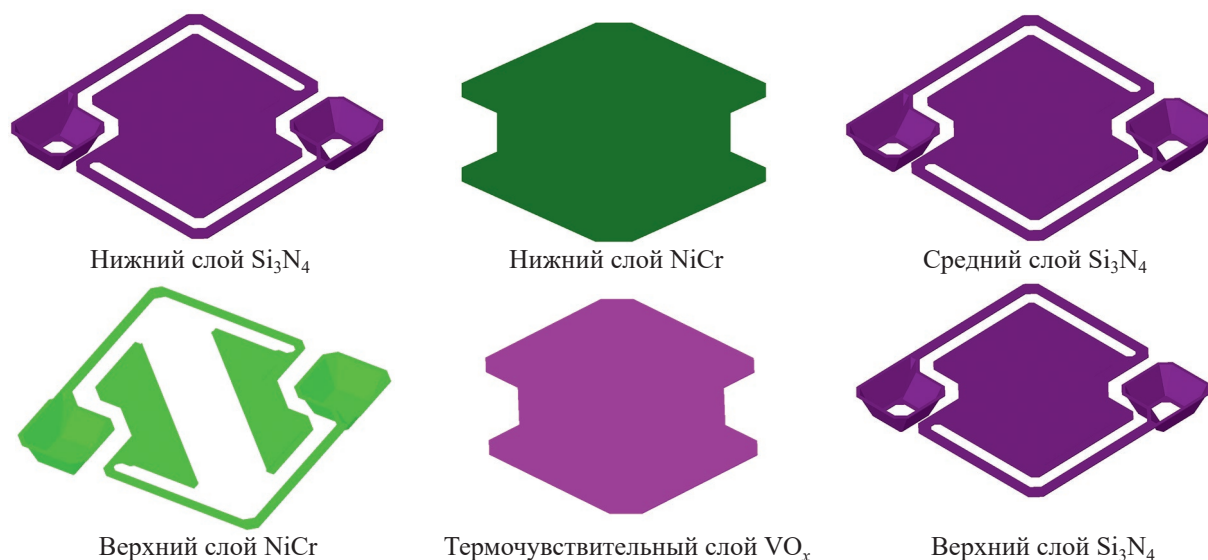


Рис. 1. Конструктивные слои микроболметра  
Fig. 1. Structural layers of the microbolometer

Для всех конструктивных слоев микроболметра определены коэффициенты преломления  $n$  и поглощения  $k$  посредством обработки данных натурального эксперимента в соответствии с итерационным методом Ньютона–Рафсона [6]. Рассчитанные коэффициенты  $n$  и  $k$  применяются при моделировании методом FDTD спектров поглощения, пропускания и отражения приборных структур микроболметров. В расчетах применялась двумерная (2D) модель, поскольку структура симметрична вдоль осей  $X$  и  $Y$ . Оптическое излучение с длиной волны  $\lambda$  от 8 до 14 мкм распространяется вдоль оси  $Z$  (рис. 2). Периодические граничные условия и идеально согласованные слои применялись перпендикулярно и параллельно оси  $Z$  соответственно. Размер моделируемой сетки был установлен от 1 нм для слоя NiCr до 50 нм для воздуха.

Рассчитанные спектры отражения  $R$  и поглощения  $A$ , а также влияние толщины каждого из конструктивных слоев микроболметра на коэффициент его поглощения представлены на рис. 3 (спектр пропускания микроболметра из-за большой толщины отражающего слоя Al близок к 0, поэтому в статье не рассматривается). Отмечено, что наибольшее влияние на коэффициент  $k$  оказывает тонкая пленка NiCr (не менее 40 % в диапазоне длин волн  $\lambda$  от 8 до 14 мкм), что подтверждает результаты, полученные в [7]. Основной задачей оптимизации являлось определение толщин конструктивных слоев микроболметра, которые обеспечивают наибольшую величину и максимальную равномерность коэффициента поглощения в диапазоне  $\lambda = 8\text{--}14$  мкм.

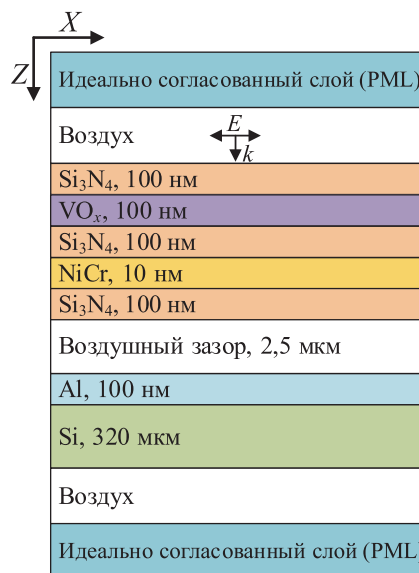


Рис. 2. Базовая FDTD-модель микроболметра  
Fig. 2. Basic FDTD model of microbolometer

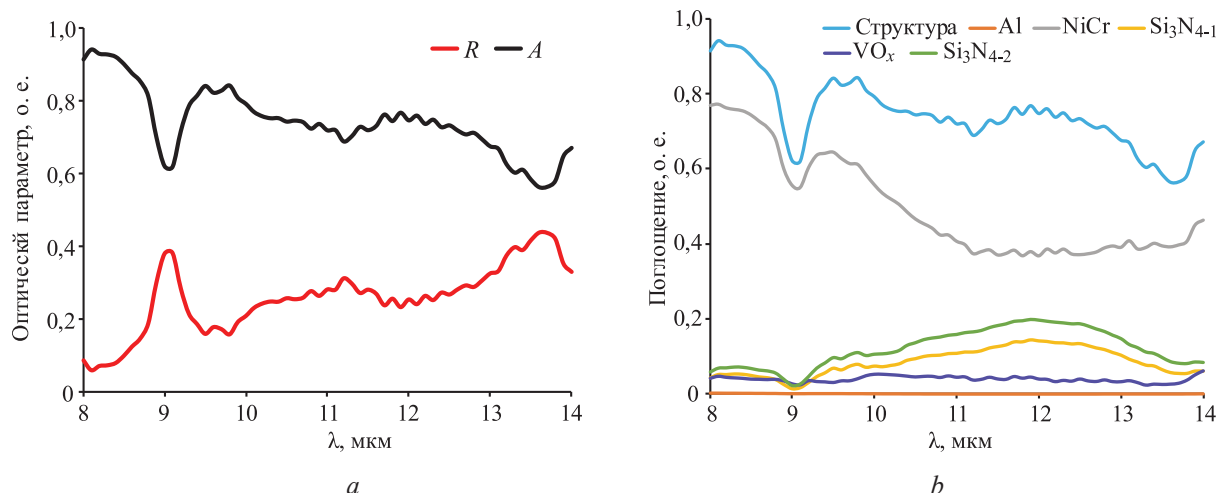
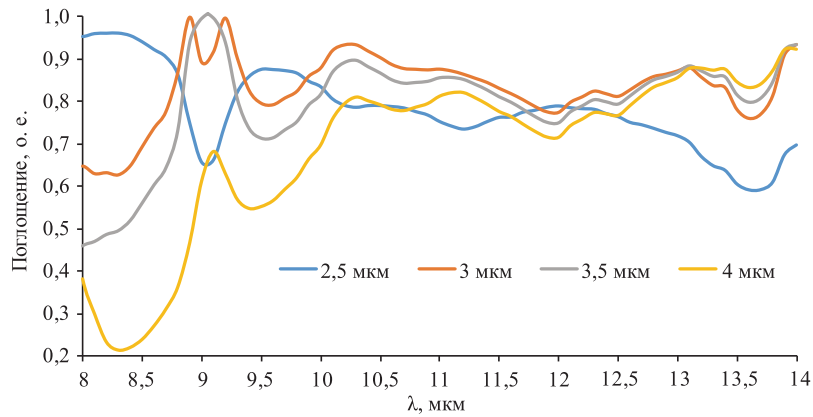


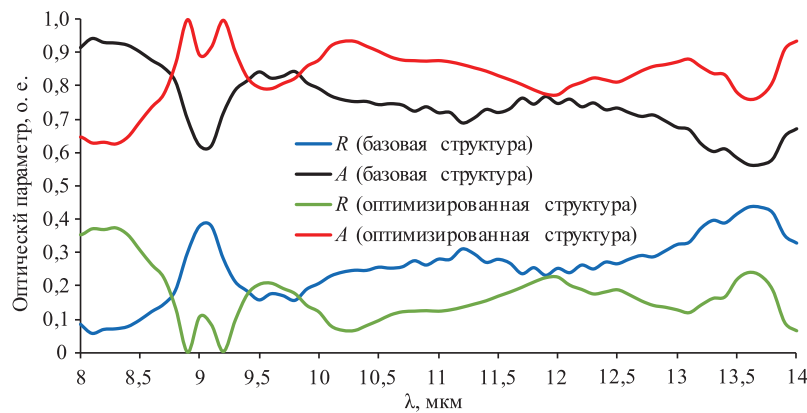
Рис. 3. Спектры отражения  $R$  и поглощения  $A$  базовой структуры микроболметра (a) и вклад каждого слоя в поглощение (b)  
Fig. 3. Reflectance  $R$  and absorption  $A$  spectra of the basic microbolometer structure (a) and the contribution of each layer to absorption (b)

Для оценки влияния толщины конструктивного слоя на коэффициент поглощения микроболметра ее величина варьировалась для каждого слоя в пределах 0,9–1,1 от значения для базовой конструкции (рис. 2). На втором этапе оптимизации выполняли серию компьютерных расчетов при изменении толщин слоев, оказывающих наибольшее влияние на коэффициент поглощения (кремниевая подложка и Al не учитывались). Таким образом, установили оптимальные с точки зрения коэффициента поглощения параметры толщин слоев: нижние слои –  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – 70 нм и NiCr – 4 нм; средний слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – 200 нм; термочувствительный слой  $\text{VO}_x$  – 250 нм; верхний слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – 150 нм. Для описанной выше структуры исследовали влияние воздушного зазора  $D$  на спектр поглощения. По результатам расчетов, представленных на рис. 4, установлено, что оптимальной является структура с воздушным зазором 3 мкм.

На рис. 5 приведены результаты сравнения характеристик приборных структур микроболметров до и после оптимизации. Показано увеличение значения среднего поглощения в диапазоне длин волн  $\lambda$  от 8 до 14 мкм на 9 % (со значения 0,77 до 0,86 о. е.), а также увеличение пикового значения на 0,0575 (со значения 0,9416 до 0,9991 о. е.).



**Рис. 4.** Зависимость поглощения структуры от длины волны падающего излучения при вариации толщины воздушного зазора  $D$   
**Fig. 4.** Dependence of the absorption of the structure on the wavelength of the incident radiation with a variation in the thickness of the air gap  $D$



**Рис. 5.** Зависимость оптических параметров структуры от длины волны падающего излучения  
**Fig. 5.** Graph of dependence of optical parameters of the structure on the wavelength of incident emission

### Расчет механических характеристик микроболметра

Для достижения требуемых эксплуатационных характеристик необходимо обеспечить сохранение постоянной величины воздушного зазора  $D$ , т. е. снижать отклонение по оси  $Z$  относительно исходного состояния  $\Delta D$ , вызванного механическими напряжениями в результате формирования структуры или ее эксплуатации. Для моделирования механических характеристик методом конечных элементов применялся программный продукт компании Coventor. Посредством термомеханического анализа проведена оценка величины  $\Delta D$ . При этом для выполнения расчета деформации структуры температура опорных «ног» микроболметра зафиксирована на значении 300 К. Следует отметить, что при расчете не учитывался рост температуры под влиянием внешнего излучения, джоулева нагрева, проводимости и т. д.

Основными параметрами, которыми можно оказывать влияние на величину  $\Delta D$ , являются толщины слоев и остаточные механические напряжения  $\sigma$  в слоях приборной структуры микроболметра. Однако толщины в данном случае не должны подвергаться изменению, поскольку это приведет к уменьшению коэффициента поглощения. Таким образом, задачей проектировщика является подбор остаточных напряжений  $\sigma$ , обеспечивающих минимальное значение  $\Delta D$ . Величина  $\sigma$  может варьироваться в широких пределах для разных материалов: для  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – от  $(-1000)$  до  $(-200)$  МПа, для  $\text{NiCr}$  – от 1000 до 3000 МПа, для  $\text{VO}_x$  – от 0 до 1000 МПа. В серии оптимизационных расчетов определены значения остаточных напряжений  $\sigma$  слоев ( $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = (-300)$  МПа,  $\sigma_{\text{NiCr}} = 3000$  МПа,  $\sigma_{\text{VO}_x} = 500$  МПа), обеспечивающих минимальную величину  $\Delta D$  (менее 0,15 мкм). Согласно рис. 6, наивысшие и наименьшие высоты мембраны различаются на 100 нм по всему пикселю, что является удовлетворительным результатом и приведет к отклонению среднего коэффициента поглощения не более чем на 0,9 %.



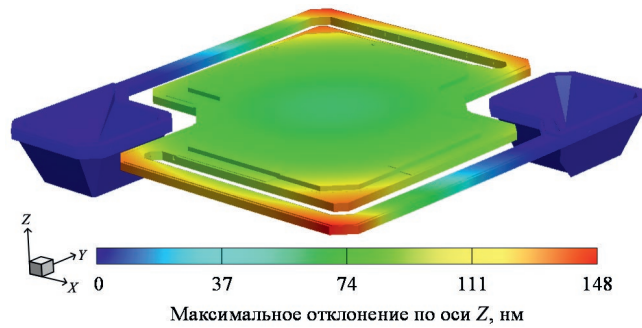


Рис. 6. Распределение максимального отклонения структуры по оси Z относительно исходного состояния  $\Delta D$

Fig. 6. Distribution of maximum structure deflection along the Z-axis relative to the initial state  $\Delta D$

### Расчет электрических характеристик микроболометра

Одними из ключевых параметров микроболометров являются общая теплопроводность (основной механизм потери тепла, минимизация которого – важное условие для достижения максимальных значений чувствительности микроболометра) и постоянная времени  $\tau$ , характеризующая реакцию датчика на внешнее воздействие. Общую теплопроводность  $G$  приборной структуры определяли с помощью стационарного теплового анализа, а постоянную времени – посредством электротермомеханического анализа при охлаждении микроболометра от максимальной установившейся температуры.

В результате выполнения электротермического анализа по постоянному току получены зависимости максимальной температуры и тока микроболометра от напряжения, а также сопротивления от температуры (рис. 7).

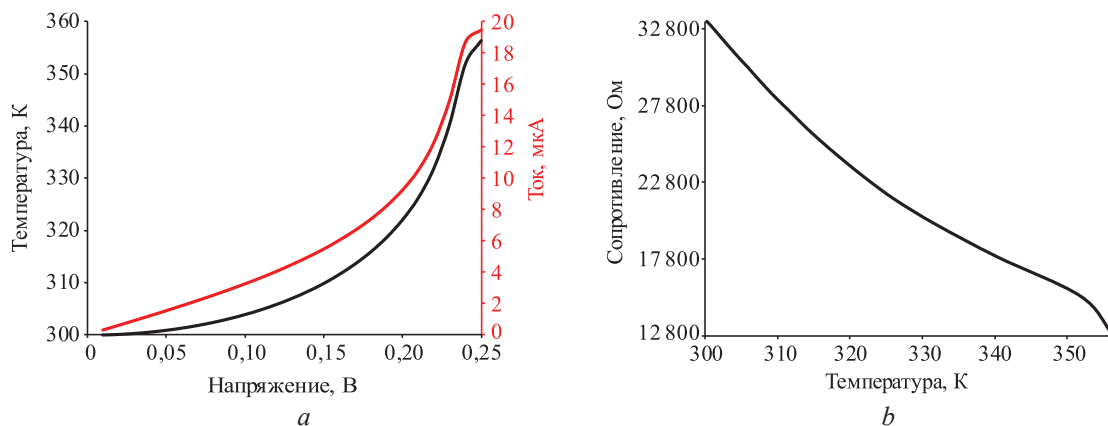
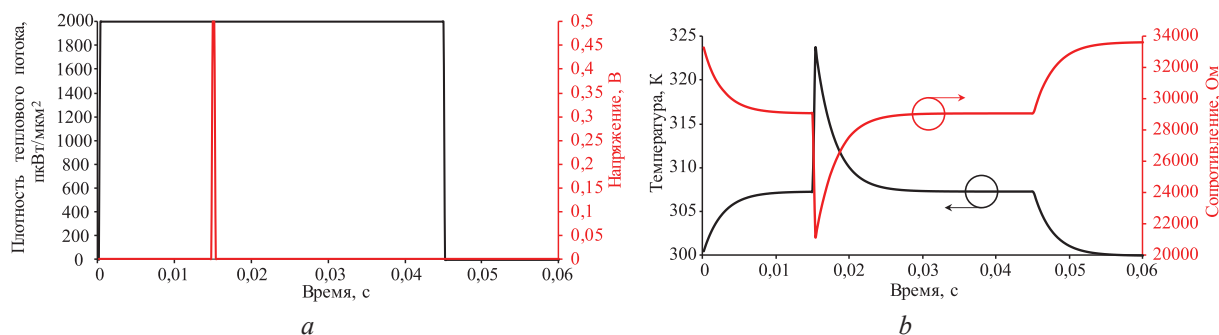


Рис. 7. Зависимость максимальной температуры и тока микроболометра от напряжения (a) и сопротивления от температуры (b)

Fig. 7. Dependence of maximum temperature and microbolometer current on voltage (a) and resistance on temperature (b)

Очевидно, что необходимо ограничивать напряжение, подаваемое на электроды микроболометра, для снижения эффекта самонагрева и предотвращения перегрева и выхода из строя микроболометра. Для моделирования практической работы устройства применяли анализ граничных условий потенциал–поверхность (Potential Surface BC), при котором учитывалась температурная реакция микроболометра как на импульсный сигнал, подаваемый на микроболометр в течение короткого промежутка времени, так и на внешний тепловой поток (рис. 8, a). На рис. 8, b представлены графики зависимости температуры и электрического сопротивления соответственно от времени при профиле приложенного напряжения и теплового потока.

В табл. 1 приведены основные параметры базовой и оптимизированной с точки зрения коэффициента поглощения приборной структуры микроболометра.



**Рис. 8.** Профили приложенного напряжения и теплового потока для анализа переходных процессов (a) и зависимость температуры и электрического сопротивления от времени (b)  
**Fig. 8.** Applied voltage and heat flux profiles for transient analysis (a) and temperature and electrical resistance dependence on time (b)

**Таблица 1.** Основные характеристики микроболметра  
**Table 1.** Main characteristics of the microbolometer

Параметр	Значение структуры	
	базовой	оптимизированной
Теплопроводность $G$ , Вт/(К·10 <sup>-8</sup> )	8,32	10,25
Постоянная времени $\tau$ , мс	2,10	2,80
Удельная теплоемкость $C$ , Дж/(К·10 <sup>-11</sup> )	17,47	28,70
Сопротивление $R$ (при 300 К), Ом	78598,36	33926,42
Температурный коэффициент сопротивления TCR, К <sup>-1</sup>	0,021	0,021
Максимальное отклонение по оси $Z$ (при 300 К), мкм	0,236	0,143

Заметно некоторое ухудшение параметров, а именно – теплопроводности (изменение на 9,3 %), постоянной времени (33,3 %) и удельной теплоемкости (64,3 %). При этом величина отклонения по оси  $Z$  относительно исходного состояния  $\Delta D$  уменьшилась 39,4 %.

### Заключение

Определены основные параметры базовой, а также посредством применения термомеханического, электротермомеханического и стационарного теплового анализ и FDTD-метода проведено исследование эксплуатационных характеристик (определены спектры отражения и поглощения активной области, зависимости температуры от напряжения, электрического сопротивления от температуры, построены временные диаграммы с профилем падающего излучения в виде теплового потока и приложенного напряжения) оптимизированной приборной структуры микроболметра. Показано увеличение среднего поглощения в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм на 9 % (со значения 0,77 до 0,86 о. е.) и механической жесткости конструкции на 39,4 % (величина отклонения по оси  $Z$  относительно исходного состояния  $\Delta D$  уменьшена с 0,236 до 0,143 мкм).

### Список литературы / References

1. Michel M., Blaeser S., Litke A. (2023) Uncooled Thermal MWIR Imagers for High-Temperature Imaging Applications. *Proc. SPIE 12737, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XX*. 1273703.
2. Karthik P. V., Isha Y., Ajitha B. (2022) Advancements of Uncooled Infrared Microbolometer Materials: A Review. *Sensors and Actuators A: Physical*. 342, 113611.
3. Dasom W., Jaeyeong B., Hyung-Jin C. (2023) Modification of Electrical Properties of Amorphous Vanadium Oxide (a-VO<sub>x</sub>) Thin Film Thermistor for Microbolometer. *Journal of Alloys and Compounds*. 937, 168295.
4. Teixeira F. L. (2023) Finite-Difference Time-Domain Methods. *Nat Rev Methods Primers*. 3, 76.
5. Smith P. W., Turner E. H. (1977) A Bistable Fabry-Perot Resonator. *Applied Physics Letters*. 30 (6), 280–281.
6. Tran Van Trieu, Korsak K. V., Novikov P. E., Lovshenko I. Yu., Zavadski S. M., Golosov D. A., Stepanov A. A., Hubarevich A. A., Kolos V. V., Solovjov Ya. A., Liauchuk D. S., Stempitsky V. R. (2023) Calculation of Optical Parameters of Thin Films of Structural Materials of Thermal Uncooled Bolometric Type Detector. *Doklady BGUIR*. 21 (5), 73–80. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-73-80> (in Russian).
7. Awad E. S., Al-Khalli N., Abdel-Rahman M., Alduraibi M., Debbar N. (2015). Comparison of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Microbolometer Optical Performance Using NiCr and Ti Thin-Films. *IEEE Photonics Technology Letters*. 27 (5), 462–465.

### Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

#### Сведения об авторах

**Чан Ван Чиеу**, асп. каф. микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

**Корсак К. В.**, магистрант каф. микро- и нанoeлектроники БГУИР

**Новиков П. Э.**, магистрант каф. микро- и нанoeлектроники БГУИР

**Ловшенко И. Ю.**, зав. науч.-исслед. лаб. «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) НИЧ БГУИР

**Завадский С. М.**, канд. техн. наук, доц., доц. каф. электронной техники и технологии, нач. центра «Электронных технологий и технической диагностики технологических сред и твердотельных структур» (Центр 9.1) НИЧ БГУИР

**Голосов Д. А.**, канд. техн. наук, доц., доц. каф. электронной техники и технологии, вед. науч. сотр. Центра 9.1 НИЧ БГУИР

**Степанов А. А.**, канд. техн. наук, доц., доц. каф. микро- и нанoeлектроники, ст. науч. сотр. лаб. «Устройства обработки и отображения информации» (НИЛ 4.7) НИЧ БГУИР

**Губаревич А. А.**, науч. сотр. НИЛ 4.7 НИЧ БГУИР

**Колос В. В.**, канд. физ.-мат. наук, зам. зав. отрасл. лаб. новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

**Соловьёв Я. А.**, канд. техн. наук, доц., зав. отрасл. лаб. новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

**Левчук Д. С.**, инж. отрасл. лаб. новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

**Стемпичский В. Р.**, канд. техн. наук, доц., проректор по научной работе, науч. рук. НИЛ 4.4 НИЧ БГУИР

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-90  
E-mail: lovshenko@bsuir.by  
Ловшенко Иван Юрьевич

#### Information about the authors

**Tran Van Trieu**, Postgraduate at Micro- and Nanoelectronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

**Korsak K. V.**, Master's Student at Micro- and Nanoelectronics Department of the BSUIR

**Novikov P. E.**, Master's Student at Micro- and Nanoelectronics Department of the BSUIR

**Lovshenko I. Yu.**, Head of the Research Laboratory "CAD in Micro- and Nanoelectronics" (Research Lab. 4.4) of R&D Department of the BSUIR

**Zavadski S. M.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology, Head of "Electronic Technologies and Technical Diagnostics of Technological Media and Solid-State Structures" (Center 9.1) of R&D Department of the BSUIR

**Golosov D. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology, Leading Researcher at the Center 9.1 of R&D Department of the BSUIR

**Stepanov A. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at Micro- and Nanoelectronics Department, Senior Researcher at the Research Lab. 4.7 of R&D Department of the BSUIR

**Hubarevich A. A.**, Senior Researcher at the Research Laboratory "Information Processing and Display Devices" (Research Lab. 4.7) of R&D Department of the BSUIR

**Kolos V. V.**, Cand. of Sci., Deputy Head of the Industry Laboratory of New Technologies and Materials of JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company

**Solovjov Ya. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Industry Laboratory of New Technologies and Materials of JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company

**Liauchuk D. S.**, Engineer of the Industry Laboratory of New Technologies and Materials of JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company

**Stempitsky V. R.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Adviser of the Research Lab. 4.4 of the BSUIR

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-90  
E-mail: lovshenko@bsuir.by  
Lovshenko Ivan Yur'evich