



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-72-80>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.384.3

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ УЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ ТЕПЛОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ БОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

ЧАН ВАН ЧИЕУ¹, И. Ю. ЛОВШЕНКО¹, В. Р. СТЕМПИЦКИЙ¹,
К. В. КОРСАК¹, ЧАН ТУАН ЧУНГ²,
ДАО ДИНЬ ХА², В. В. КОЛОС³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Вьетнамский государственный технический университет
имени Ле Куи Дона (Ханой, Вьетнам)

³ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 27.01.2023

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

Аннотация. В статье приведен сравнительный анализ характеристик основных типов болометров. Исследовано конструктивное решение неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа, сформированного по технологии микроэлектромеханических систем. Посредством компьютерного моделирования в современных системах автоматизированного проектирования в микроэлектронике для оценки влияния механических напряжений, возникающих в конструктивных материалах при их формировании, на величину деформации выполнен статический механический анализ. Установлено, что для обеспечения нормального функционирования микроболометра (уменьшения максимального отклонения пленки от номинального значения) необходимо уменьшить внутренние механические напряжения в пленке NiCr. Для пленок Si₃N₄, напротив, это значение следует увеличивать.

Ключевые слова: интегральный неохлаждаемый тепловой детектор, микроболометр, моделирование, механические напряжения, деформация.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Исследования выполнены при финансовой поддержке и в рамках решения задач задания 3.3 Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций», 2021–2025 гг.

Для цитирования. Применение систем автоматизированного проектирования для учета механических напряжений при разработке неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа / Чан Ван Чиеу [и др.] // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 1. С. 72–80 <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-72-80>.

APPLICATION OF CAD SYSTEMS TO ACCOUNTING FOR MECHANICAL STRESSES IN THE DEVELOPMENT OF UNCOOLED THERMAL DETECTORS OF THE BOLOMETRIC TYPE

TRAN VAN TRIEU¹, IVAN YU. LOVSHENKO¹, VIKTOR R. STEMPIISKY¹,
KIRILL V. KORSACK¹, TRAN TUAN TRUNG², DAO DINH HA², VLADIMIR V. KOLOS³

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Le Quy Don University of Science and Technology (Hanoi, Vietnam)

³Joint-Stock Company "INTEGRAL" – Manager Holding Company "INTEGRAL"
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 27.01.2023

Abstract. A comparative analysis of the characteristics of the main types of bolometers is indicated in the article. The constructive solution of an uncooled thermal detector of the bolometric type, formed using the technology of microelectromechanical systems, is studied. By means of computer simulation in modern computer-aided design systems in microelectronics, a static mechanical analysis was performed to assess the effect of mechanical stresses arising in structural materials during their formation on the magnitude of deformation. It has been established that to ensure the normal functioning of the microbolometer (to reduce the maximum deviation value of the film from the nominal value), it is necessary to reduce the internal mechanical stresses in the NiCr film. For the Si₃N₄ films, on the contrary, this value should be increased.

Keywords: integral uncooled thermal detector, microbolometer, modeling, mechanical stresses, deformation.

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

Gratitude. The research was carried out with financial support and as part of solving the tasks of assignment 3.3 of the state research program "Photonics and electronics for innovation", 2021–2025.

For citation. Tran Van Trieu, Lovshenko I. Yu., Stempitsky V. R., Korsak K. V., Tran Tuan Trung, Dao Dinh Ha, Kolos V. V. (2023) Application of Cad Systems to Accounting for Mechanical Stresses in the Development of Uncooled Thermal Detectors of the Bolometric Type. *Digital Transformation*. 29 (1), 72–80. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-72-80> (in Russian).

Введение

Области применения тепловых детекторов постоянно расширяются, например, в таких сферах, как системы безопасности и наблюдения, пожаротушение, биомедицина. Наиболее перспективное направление развития устройств данного типа – создание эффективных конструкций неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа (микроболометров), которые представляют собой резистивный элемент, выполненный из материала с низкой теплоемкостью и высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), чтобы поглощаемое излучение вызывало существенное изменение сопротивления активного слоя. В отличие от полупроводников в этом материале должно отсутствовать прямое фотонно-электронное взаимодействие, а основным механизмом и причиной изменения сопротивления должен служить нагрев структуры. При пропускании точно контролируемого тока смещения через детектор определяется изменение выходного напряжения. В статье исследовано конструктивное решение микроболометра, сформированного по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) и обладающего рядом значимых преимуществ перед другими реализациями аналогичных по функционалу и назначению приборов: малая потребляемая мощность, относительно низкая стоимость, возможность функционирования при комнатной температуре [1–3].

Существенный фактор, требующий учета при проектировании МЭМС, – анализ влияния внутренних механических напряжений, возникающих вследствие нагрева или других причин, на характеристики структуры прибора. Анализ указанных физических процессов может быть осуществлен в рамках компьютерного моделирования. Применяемое специальное программное обеспечение должно позволить решить комплекс задач математической физики (деформации твердого тела, теплопроводности, диффузии, электростатики, гидродинамики и др.). Универсальные пакеты конечного элементного анализа, такие как ANSYS, Algor, COMSOL Multiphysics (Femlab) и другие, обеспечивают решение описанных выше задач [4]. С точки зрения соотноше-

ния скорости моделирования, точности получаемых результатов и доступных функциональных возможностей наиболее оптимальным решением является использование программного комплекса компании Coventor (<https://www.coventor.com/>), который позволяет реализовать полный цикл проектирования МЭМС-устройства с функцией экспорта результатов в программные продукты схемно-топологического и математического моделирования типа MATLAB и Cadence Virtuoso, а также имеет возможности расширения функционала и включения собственных моделей за счет интегрированного Python-интерпретатора.

Конструктивные решения и материалы МЭМС-микроболометров

Разработка современной технологии болометров началась в начале 1980-х годов компаниями Honeywell [5] (в рамках исследований технологических процессов формирования тонкопленочных элементов на основе оксида ванадия) и Texas Instruments [1] (при изучении возможных областей применения аморфного кремния (α -Si)). В зависимости от используемого в качестве активного (детектирующего) элемента термочувствительного материала выделяют металлические, полупроводниковые (кремниевые, германиевые и другие), сверхпроводящие болометры, а также термисторы. Характеристики основных типов болометров представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики основных типов болометров
Table 1. Characteristics of the main types of bolometers

Тип/Type	D^* , см·Гц ^{1/2} /Вт, ×10 ⁸	ЭМШ, Вт/Гц ^{1/2} , ×10 ⁻¹⁰	τ_{th} , мс	Размер, мм ² / Size, mm ²
Кремниевый болометр	–	$3 \cdot 10^{-5}$	8	От 0,25 до 0,70
Металлический болометр	1	–	10	–
Термистор	От 1 до 6	–	От 1 до 8	От 0,01 до 10,00
Германиевый болометр	–	$5 \cdot 10^{-3}$	0,4	1,5
Углеродный болометр	–	0,05	10	20
Сверхпроводящий болометр	–	0,5	0,5	1,25
Термопара	–	От 2 до 10	От 10 до 40	От 0,1 до 0,9
Термобатарея	–	–	От 3,3 до 10,0	От 1 до 100
Пироэлектрики	От 2 до 5	–	От 10 до 100	4
Ячейка Голея	10	0,6	От 10 до 30	10

Обозначения:
 D^* – удельная обнаружительная способность;
 ЭМШ – эквивалентная мощность шума;
 τ_{th} – постоянная времени (время отклика).

Один из первых вариантов МЭМС-микроболометра предложен в [6]. Он представляет собой тонкую подложку из кремния Si, поддерживаемую узкими ножками, формируемую с помощью методов оптической литографии. На обратной стороне подложки в качестве материала для поглощения использовали висмут (Bi), но термочувствительный слой создавали непосредственно в кремниевой подложке путем имплантации ионов фосфора (P) и бора (B). Производительность болометра оказалась невысокой. Два типовых варианта структуры МЭМС-микроболометров представлены на рис. 1 [7].

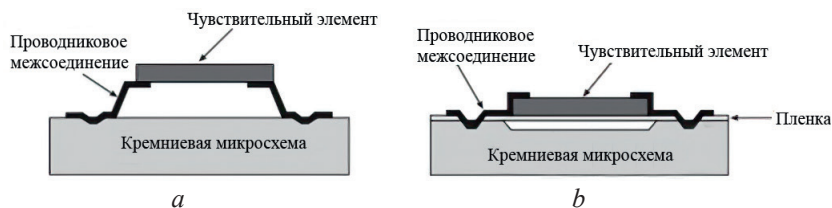


Рис. 1. Конструктивные решения элемента теплового детектора (МЭМС-болометра):
 а – микромостовой детекторный элемент; б – элемент детектора с опорой на пленку
Fig. 1. Thermal detector element design (MEMS bolometer): a – microbridge detector element;
 b – detector element supported by a film

Конструктивное решение, изображенное на рис. 1, *a*, содержит термочувствительные элементы, которые опираются на микромостики, расположенные над поверхностью интегральных микросхем (ИМС) обработки данных. Микромостики сконструированы так, чтобы иметь высокое тепловое и низкое электрическое сопротивление, дабы не препятствовать протеканию тока через структуру. Концепция, приведенная на рис. 1, *b*, состоит из элементов детектора, нанесенных на тонкую диэлектрическую пленку, которая копланарна поверхности пластины и является основой технологии монокристаллических детекторов [7–9].

Основными требованиями к термочувствительным материалам, используемым в микроболометрах, являются высокий ТКС, умеренное удельное сопротивление, низкий уровень шума и совместимость с технологией кремниевых (Si) ИМС. Наиболее часто применяемые термочувствительные материалы – оксид ванадия (VO_x), аморфный и поликристаллический кремний, некоторые металлы [10–12]. На рис. 2 показаны структуры слоев активной (термочувствительной) области микроболометра на основе VO_x и $\alpha\text{-Si}$.

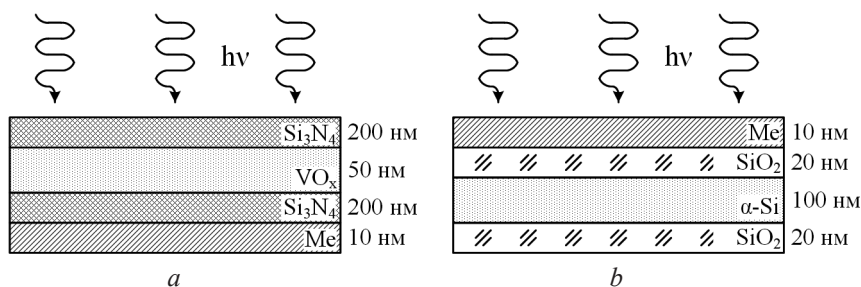


Рис. 2. Структура слоев термочувствительной области микроболометра: *a* – VO_x ; *b* – $\alpha\text{-Si}$
Fig. 2. Layer structure of the thermosensitive region of the microbolometer: *a* – VO_x ; *b* – $\alpha\text{-Si}$

Ванадий представляет собой металл с переменной валентностью, образующий большое количество оксидов, среди которых наиболее исследованы VO_2 , V_2O_3 и V_2O_5 . Следует отметить, что указанные оксиды характеризуются значительными различиями в электрических и оптических свойствах [13–16]. С точки зрения применения в качестве конструктивного элемента микроболометра лучшим свойством, которым обладает VO_x , является его высокий отрицательный ТКС при температуре окружающей среды, превышающий 3 %/К. Пленки VO_x получают методами реактивного радиочастотного напыления, импульсного лазерного осаждения, отжига и окисления испаренного ванадия в контролируемых условиях [17]. При этом важная задача – получение высокого ТКС в сочетании с достаточно малым сопротивлением пленки [18, 19].

Аморфный кремний $\alpha\text{-Si}$ широко используется в качестве активного слоя в тонкопленочных транзисторах для жидкокристаллических дисплеев, фотоэлектрических устройств малой площади и солнечных батарей [20]. Он имеет характерные значения ТКС при комнатной температуре в диапазоне от $0,025 \text{ K}^{-1}$ для легированных пленок с малым удельным сопротивлением до $0,06 \text{ K}^{-1}$ для материалов с большим удельным сопротивлением [21]. Использование аморфного кремния позволяет уменьшить размеры пикселя [22], при этом крайне важно, чтобы чувствительный элемент микроболометра был теплоизолирован. Наилучшая теплоизоляция и самые низкие тепловые характеристики достигаются в конструкциях МЭМС, которые применяются в системах инфракрасных решеток в фокальной плоскости (IRFPA).

В настоящее время разработка неохлаждаемых фокально-плоскостных матриц (FPA – Focal Plate Arrays), которые являются базовым конструктивным элементом микроболометра, идет в двух направлениях:

- матрицы для коммерческих устройств и систем двойного применения высокого класса чувствительности с максимально возможной производительностью;
- матрицы для коммерческих устройств с минимально возможной стоимостью.

При этом ключевой фактор – поиск высокопроизводительного датчика вместе с высокой теплоизоляцией на минимально возможной площади. При подвешивании (закреплении) термочувствительного элемента подложки в форме перемычки, чтобы свести к минимуму потери тепла из-за проводимости через подложку, применяются различные методы микрообработки. Чаще всего реализуемый подход к изготовлению болометров – формирование их с использованием поверхностных МЭМС-микромостов. Технология поверхностной микрообработки позволяет наносить термочувствительные слои с очень малыми толщиной и массой, с хорошей термоизоляцией по-

верх микромостов, расположенных над поверхностью. Термически изолированные и подвешенные детекторные структуры получают после удаления временных слоев между конструкциями микромостов и схемой считывания.

Методика проведения моделирования

Для описания поведения МЭМС-устройств применяются различные подходы: аналитические, с помощью поведенческих моделей (ROM), с использованием дискретной модели на основе конечных элементов, а также сочетание нескольких способов описания.

Программный комплекс компании Coventor – одна из наиболее перспективных систем автоматизированного проектирования для МЭМС. Главным преимуществом данного продукта является возможность прохождения полного цикла проектирования устройства за относительно короткий промежуток времени. Используя инструмент CoventorWare, можно создать описание приборной структуры, задать параметры исходных материалов и выполнить моделирование эксплуатационных характеристик болометра, учитывающих влияние внутренних механических напряжений и механических напряжений, вызванных внешним воздействием. Результаты проектирования устройств, созданных в инструменте CoventorMP, легко могут быть интегрированы с большинством смежных программных продуктов для дальнейшего анализа получившихся устройств, а именно с MATLAB, Cadence Virtuoso, MathWorks Simulink и т. д. Весомый аргумент – поддержка консолью CoventorMP скриптов, написанных на языке программирования Python. Данная возможность позволяет в более полной мере использовать высокопроизводительные вычислительные ресурсы. Кроме того, немаловажную роль играет возможность моделирования объемных устройств из заранее подготовленных плоских моделей, что существенно расширяет спектр функций данного программного продукта и увеличивает скорость проектирования.

Приборная структура и результаты моделирования

Стандартная конструкция микроболометра состоит из одной подвесной многослойной мембраны и длинных опорных ножек [23]. Мембрана включает пленки из диэлектрического и термочувствительного материала, проводящие и поглощающие слои. Основным механизмом передачи тепла является теплопроводность от термочувствительного материала к подложке через несущую конструкцию, которая выполняет три функции: механическую, токопроводящую и теплопроводную. В качестве конструктивных, токопроводящих и теплопроводных материалов могут использоваться Si [7], NiCr, Ti, Si₃N₄ [9, 24], SiGe [25], TiN, TiW, Al₂O₃ [26], двумерные материалы [27] и др. На рис. 3 изображены слои исследуемой микроболометрической структуры с коэффициентом заполнения $S_a/S_f = 0,66$. Характеристики используемых конструкционных материалов представлены в табл. 2.

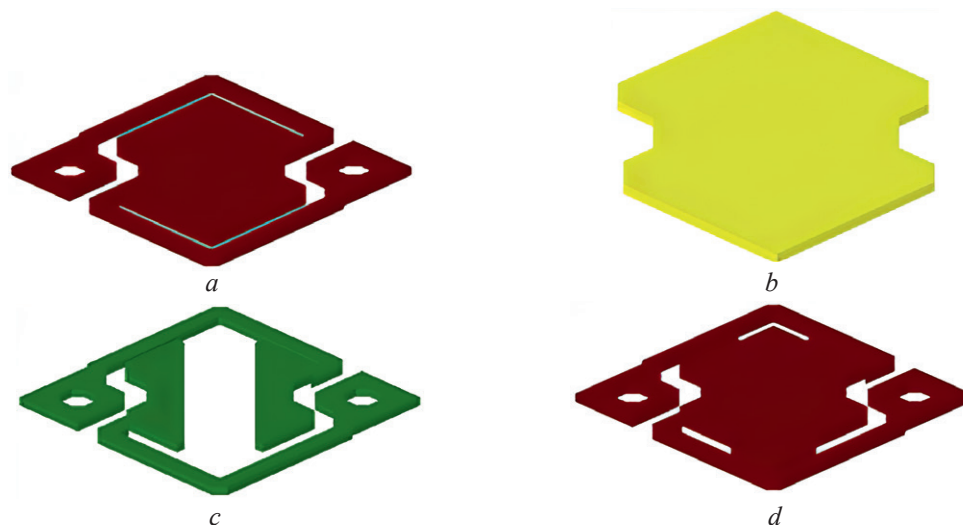


Рис. 3. Вид микроболометрической структуры с толщиной каждого из слоев 0,1 мкм:
a – первый слой Si₃N₄; b – α -Si; c – NiCr; d – второй слой Si₃N₄

Fig. 3. View of the microbolometric structure with thickness of each layer 0.1 μ m:
a – first layer of Si₃N₄; b – α -Si; c – NiCr; d – second layer of Si₃N₄

Таблица 2. Характеристики Si_3N_4 и NiCr, используемых в качестве элементов конструкции микроболометра
Table 2. Properties of Si_3N_4 and NiCr used as microbolometer construction elements

Параметр/Parameter	Значение параметра для материала/Parameter value for material	
	Si_3N_4	NiCr
Константа упругости (изотропная модель)	$E = 2,22 \cdot 10^5, \mu = 0,27$	$E = 104, \mu = 0,20$
Плотность, кг/мкм ³	$2,7 \cdot 10^{-15}$	$4,6 \cdot 10^{-15}$
Экспоненциальный температурный коэффициент сопротивления, 1/К	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,44 \cdot 10^{-5},$ $ZST = 2,7315 \cdot 10^2$
Теплопроводность, пВт/(мкм·К)	$2,0 \cdot 10^6$	$2,08 \cdot 10^7$
Удельная теплоемкость, пДж/(кг·К)	$1,7 \cdot 10^{14}$	$5,0 \cdot 10^{14}$
Электрическая проводимость, пСм/мкм	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,83 \cdot 10^{12}$

Посредством компьютерного моделирования (статического механического анализа) в программном комплексе компании Coventor выполнено исследование влияния механических напряжений, возникающих в конструктивных материалах приборных структур микроболометров при их формировании, на величину деформации (максимальное отклонение по оси Z). Значения внутренних механических напряжений в конструктивных материалах Si_3N_4 и NiCr варьировались в пределах $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ от минус 300 до 300 МПа и σ_{NiCr} от минус 1000 до 1000 МПа. Изучено влияние механических напряжений в пленке Si_3N_4 толщиной 0,1 мкм, подвешенной на высоте 2,5 мкм над кремниевой подложкой на столбиках из NiCr. Результаты экспериментов представлены на рис. 4.

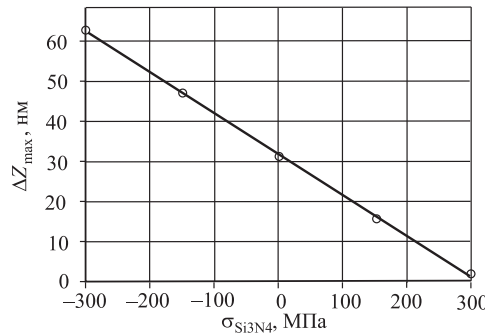


Рис. 4. Зависимость максимального отклонения по оси Z от $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$
Fig. 4. Dependence of the maximum deviation on the axis Z of $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$

Установлено, что механические напряжения $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ от минус 300 до 300 МПа обеспечивают стабильность конструкции в отсутствие теплового потока. Наиболее оптимальное значение внутренних механических напряжений составляет 300 МПа. Отмечено, что воздействие теплового потока P величиной более 300 пВт/мкм² приводит к полному разрушению конструкции из-за низкой теплопроводности Si_3N_4 . На рис. 5 представлена структура пленки Si_3N_4 при $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$ МПа и $P = 300$ пВт/мкм².

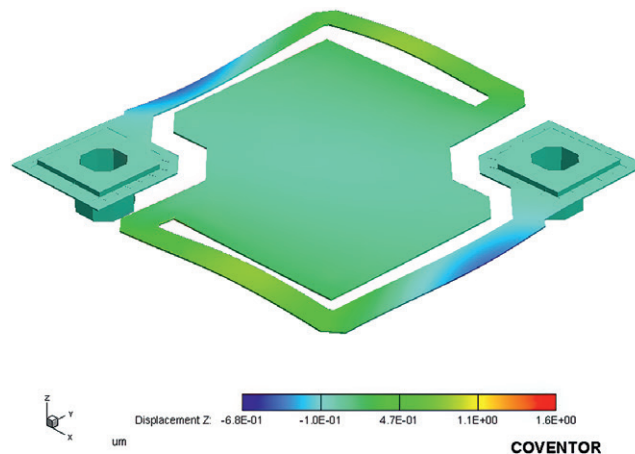


Рис. 5. Структура пленки Si_3N_4 при $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$ МПа и $P = 300$ пВт/мкм²
Fig. 5. Structure of the Si_3N_4 film at $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$ МПа and $P = 300$ pW/ μm^2

Исследовано влияние механических напряжений в пленках Si_3N_4 и NiCr толщиной 0,1 мкм, подвешенных на высоте 2,5 мкм над кремниевой подложкой на столбиках из NiCr. Результаты моделирования при нормальных условиях (отсутствие теплового потока) приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты моделирования при нормальных условиях (тепловой поток отсутствует)

Table 3. Simulation results under normal conditions (no heat flow)

$\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$, МПа/ $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$, МПа	Максимальное отклонение по оси Z, мкм, при σ_{NiCr} , МПа/ Maximum deviation along the Z axis, μm , at σ_{NiCr} , МПа								
	-1000	-750	-500	-250	0	250	500	750	1000
-300	6,733	4,950	3,210	1,514	0,324	1,990	3,570	5,060	6,480
-200	6,767	5,027	3,259	1,541	0,270	1,970	3,530	5,020	6,440
-100	6,811	5,050	3,308	1,588	0,215	1,930	3,490	4,980	6,390
0	6,893	5,122	3,358	1,655	0,160	1,867	3,446	4,941	6,358
100	6,943	5,195	3,407	1,709	0,104	1,841	3,404	4,914	6,336
200	7,033	5,226	3,456	1,730	0,048	1,800	3,360	4,870	6,290
300	7,072	5,266	3,516	1,777	0,009	1,740	3,320	4,830	6,260

Установлено, что механические напряжения σ_{NiCr} оказывают существенное влияние на деформацию конструкции. Не рекомендуется получать пленки со значением σ_{NiCr} не попадающим в диапазон от минус 100 до 100 МПа, поскольку приборные структуры с такими пленками не обеспечивают стабильность конструкции в отсутствие теплового потока (рис. 6).

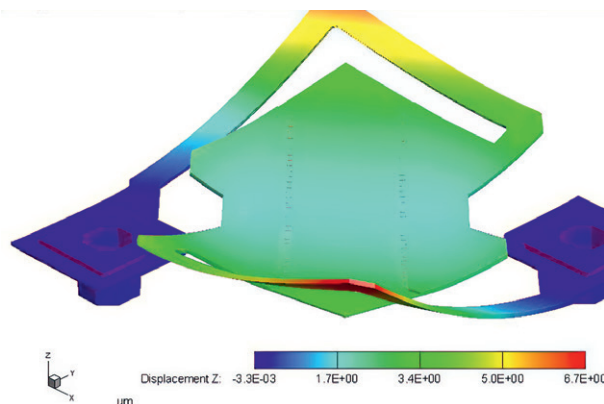


Рис. 6. Структура $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$ при $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$ МПа и $\sigma_{\text{NiCr}} = -1000$ МПа (тепловой поток отсутствует)

Fig. 6. Structure of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$ at $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$ МПа and $\sigma_{\text{NiCr}} = -1000$ МПа (no heat flow)

Анализируя результаты исследования, можно отметить, что конструкция $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$ более устойчива к воздействию тепловых потоков с показателем более 100 пВт/мкм². Конструкция $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$ с $\sigma_{\text{NiCr}} = 0$ МПа и $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$ МПа остается стабильной при воздействии теплового потока величиной до $P = 700$ пВт/мкм². При этом максимальное отклонение по оси Z не превышает 9 нм для $P = 0$ пВт/мкм², 227 нм для $P = 100$ пВт/мкм², 457 нм для $P = 200$ пВт/мкм², 901 нм для $P = 400$ пВт/мкм² и 1,5 мкм для $P = 700$ пВт/мкм². На рис. 7 представлен результат моделирования конструкции $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$ при $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$ МПа и $P = 700$ пВт/мкм².

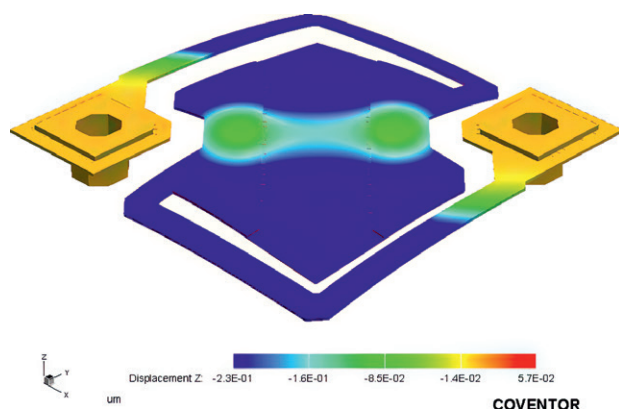


Рис. 7. Структура $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$ при $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$ МПа и $P = 700$ пВт/мкм²

Fig. 7. Structure of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$ at $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$ МПа and $P = 700$ пВт/мкм²

Заключение

1. Посредством компьютерного моделирования исследовано влияние внутренних механических напряжений на деформацию приборных структур микроболометров в отсутствие и при воздействии теплового потока. Для обеспечения нормального функционирования микроболометра (уменьшения максимального отклонения пленки от номинального значения) необходимо уменьшить внутренние механические напряжения в пленке NiCr. Для пленок Si₃N₄, напротив, это значение нужно увеличить.

2. Механические напряжения σ_{NiCr} оказывают существенное влияние на деформацию конструкции. Не рекомендуется получать пленки со значением σ_{NiCr} , не попадающим в диапазон от минус 100 до 100 МПа, поскольку приборные структуры с такими пленками не обеспечивают стабильность конструкции в отсутствие теплового потока.

References

1. Wood R. A., Han C. J., Kruse P. W. (1992) Integrated Uncooled Infrared Detector Imaging Arrays. *Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 5th Technical Digest, IEEE*. 132–135.
2. Takamuro D., Tomohiro M., Takaki S. (2011) Development of New SOI Diode Structure for Beyond 17-um-Pixel Pitch SOI Diode Uncooled IRFPAs. *Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering*. (8012), 80121E.
3. Li C., Han C. J., Skidmore G. D., Hess C. (2010) DRS Uncooled VO_x Infrared Detector Development and Production Status. *Proc SPIE*. (7660), 76600V.
4. Kolovsky A. A., Levitsky A. A., Marinushkin P. S. (2008) Computer Modeling of MEMS Components. *Problems of Development of Promising Micro- and Nanoelectronic Systems*. (1), 398.
5. Flannery R. E., Miller J. E. (1989) Status of Uncooled Infrared Imagers. *Journals of SPIE*. (1), 379.
6. Downey P. M., Jeffries A. D., Meyer S. S., Weiss R., Bachner F. J., Donnelly J. P., Lindley W. T., Mountain R. W., Silversmith D. J. S. (1984) Monolithic Silicon Bolometers. *Appl. Opt.* (23), 14.
7. Liddiard K. C. (1993) Thin Film Monolithic Arrays for Uncooled Thermal Imaging. *Proc. SPIE*. (16), 206.
8. Unewisse M. H., Passmore S. J., Liddiard K. C., Watson R. J. (1994) Performance of Uncooled Semiconductor Film Bolometer Infrared Detectors. *Proc. SPIE*. (43), 52.
9. Wood R. A. (1993) High-Performance Infrared Thermal Imaging with Monolithic Silicon Focal Planes Operating at Room Temperature. *Technical Digest*. (77), 175.
10. Cole B. E., Higashi R. E., Wood R. A. (2000) Micromachined Pixel Arrays Integrated with CMOS for Infrared Applications. *Int. Conf. on Optical MEMS, IEEE*. 63.
11. Syllaios A. J., Schimert T. R., Gooch R. W., McCardel W. L., Ritchey B. A., Tregilgas J. H. (2000) Amorphous Silicon Microbolometer Technology. *Proc. Mater. Res. Soc., San Francisco, CA, USA*. 609, A14.4.
12. Mottin E., Astrid B., Jean-Luk M. (2003) Uncooled Amorphous Silicon Technology Enhancement for 25-um-Pixel Pitch Achievement. *Proc. SPIE Infrared Technology and Applications XXVIII, Seattle USA*. 4820, 200.
13. Jerominek H., Picard F., Vincent D. (1993) Vanadium Oxide Films for Optical Switching and Detection. *Opt. Eng.* (32), 99.
14. Kuźma E. (1993) Contribution to the Technology of Critical Temperat. Resistors. *Electron Technol.* 26 (2/3), 129.
15. Jerominek H., Pope T. D., Renaud M., Swart N. R., Picard F., Lehoux M., Savard S. (1997) 64×64, 128×128 and 240×320 Pixel Uncooled IR Bolometric Detector Arrays. *Proc. SPIE*. (30), 47.
16. Chen C., Yi X., Zhang J., Xiong B. (2001) Micromachined Uncooled IR Bolometer Linear Array Using VO₂ Thin Films. *Int. J. Infrared Millim. Waves*. (22), 53.
17. Niklaus F., Vieider C., Jakobsen H. (2007) MEMS-based Uncooled Infrared Bolometer Arrays: a Review. *Proc. SPIE*. (68), 36.
18. Soltani M., Chaker M., Haddad E., Kruzelecky R. V., Margot J. (2004) Effects of Ti-W Codoping on the Optical and Electrical Switching of Vanadium Dioxide Thin Films Grown by a Reactive Pulsed Laser Deposition. *Appl. Phys. Lett.* (85), 60.
19. Han Y. H., Kim K. T., Shin H. J., Moon S. (2005) Enhanced Characteristics of an Uncooled Microbolometer Using Vanadium-Tungsten Oxide as a Thermoelectric Material. *Appl. Phys. Lett.* (86), 3.
20. Syllaios A. J., Schimert T. R., Gooch R. W., McCardel W. L., Ritchey B. A., Tregilgas J. H. (2000) Amorphous Silicon Microbolometer Technology. *MRS Proc.* (14), 6.
21. Liddiard K. C., Ringh U., Jansson C., Reinhold O. (1998) Progress of Swedish-Australian Research Collaboration on Uncooled Smart IR Sensors. *Proc. SPIE*. (34), 84.
22. Tisse C.-L., Tissot J.-L., Crastes A. (2012) An Information-Theoretic Perspective on the Challenges and Advances in the Race Toward 12 μm Pixel Pitch Megapixel Uncooled Infrared Imaging. *Proc. SPIE*. (8353), 83531M-1.
23. Wang J., Li W., Gou J., Wu Z., Jiang Y. (2014) Fabrication and Parameters Calculation of Room Temperature Terahertz Detector with Micro-bridge Structure. *J. Infrared Milli Terahertz Waves*. 35 (12), 987–1082.
24. Safy M., Zaky A. H., Mitkes A. (2008) Thermal Modeling of a High Fill-factor Micromachined Bolometer for Thermal Imaging Applications. *ICEENG The International Conference on Electrical Engineering*. 6.

25. Malm G. B. (2012) Micromechanical Process Integration and Material Optimization for High Performance Silicon-Germanium Bolometers. *MRS Online Proceedings Library*. 1437.
26. Varpula A. (2021) Nano-Thermoelectric Infrared Bolometers. *APL Photonics*. 036111.
27. Chiang S.-Y. (2020) 2D Material-Enabled Nanomechanical Bolometer. *Nano Letters*. 2326–2331.

Вклад авторов

Чан Ван Чиёу выполнил анализ существующих конструктивных решений и провел моделирование эксплуатационных характеристик микроболометра. Ловшенко И. Ю. выполнил интерпретацию результатов моделирования, подготовил рукопись статьи. Стемпицкий В. Р. осуществил постановку задач для проведения исследования, подготовил рукопись статьи. Корсак К. В. выполнил анализ конструктивных решений и применяемых материалов МЭМС-микроболометров. Чан Туан Чунг и Дао Динь Ха выполнили моделирование эксплуатационных характеристик микроболометра. Колос В. В. осуществил постановку задачи для проведения исследования, получил экспериментальные результаты.

Authors' contribution

Tran Van Trieu analyzed the existing design solutions and conducted a simulation of the operational characteristics of the microbolometer. Lovshenko I. Yu. interpreted the simulation results, prepared the manuscript of the article. Stempitsky V. R. established the task for the research, prepared the manuscript of the article. Korsak K. V. analyzed the design solutions and materials used for the MEMS microbolometers. Tran Tuan Trung and Dao Dinh Ha performed a simulation of the operational characteristics of the microbolometer. Kolos V. V. formulated the tasks for the study, received experimental results.

Сведения об авторах

Чан Ван Чиёу, аспирант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Ловшенко И. Ю., заведующий научно-исследовательской лабораторией «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем» НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Стемпицкий В. Р., к. т. н., доцент, проректор по научной работе, научный руководитель научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем» НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Корсак К. В., магистрант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Чан Туан Чунг, к. т. н. Вьетнамского государственного технического университета имени Ле Куи Дона

Дао Динь Ха, к. т. н. Вьетнамского государственного технического университета имени Ле Куи Дона

Колос В. В., заместитель заведующего отраслевой лабораторией новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

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 the Department of Micro- and Nanoelectronics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Lovshenko I. Yu., Head of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” at the R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Stempitsky V. R., Cand. of Sci., Associate Professor, Vice-Rector for Research and Development, Adviser of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” at the R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Korsak K. V., Master’s Student at the Department of Micro- and Nanoelectronics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Tran Tuan Trung, Cand. of Sci. of the Le Quy Don University of Science and Technology

Dao Dinh Ha, Cand. of Sci. of the Le Quy Don University of Science and Technology

Kolos V. V., Deputy Head of the Industry Laboratory of New Technologies and Materials of the Joint-Stock Company “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL”

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