



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-29-34>

УДК 621.384.3

РАСЧЕТ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НЕОХЛАЖДАЕМОГО ТЕПЛОВОГО ДЕТЕКТОРА БОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

А. Е. ЖАМОЙТЬ, Я. А. СОЛОВЬЁВ, А. Э. ВИДРИЦКИЙ

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

Аннотация. В настоящее время неохлаждаемые тепловые детекторы являются одними из наиболее востребованных фотоприемных устройств, поскольку сочетают в себе приемлемые оптические характеристики при отсутствии необходимости поддерживать нужную температуру. Основное преимущество неохлаждаемых тепловых детекторов перед охлаждаемыми – относительная дешевизна изготовления. Из этого следует и основной недостаток – уменьшение чувствительности за счет воздействия температуры внешней среды на прибор. Изменение толщин конструктивных слоев активных элементов микроболометрической матрицы является одним из наиболее легкодоступных способов повышения чувствительности. Путем моделирования спектров поглощения и последующего расчета интегрального коэффициента поглощения в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм установлено, что этот коэффициент увеличивается с 60 до 81 % при уменьшении толщины поглощающего слоя из NiCr с 10 до 4 нм. Полученные результаты могут быть использованы для повышения оптических характеристик изготавливаемых неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа.

Ключевые слова: фотоприемное устройство, отражающий слой, оптический резонатор, чувствительный элемент, ИК-диапазон, коэффициент поглощения, теплоемкость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Жамойть, А. Е. Расчет интегрального коэффициента поглощения чувствительного элемента неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа / А. Е. Жамойть, Я. А. Соловьёв, А. Э. Видрицкий // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 29–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-29-34>.

CALCULATION OF THE INTEGRAL ABSORPTION COEFFICIENT OF THE SENSITIVE ELEMENT OF AN UNCOOLED THERMAL DETECTOR OF THE BOLOMETRIC TYPE

ALEKSANDER E. ZHAMOIT, JAROSLAV A. SOLOVJOV, ALEKSANDER E. VIDRITSKIY

JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Currently, uncooled thermal detectors are among the most popular photodetectors, since they combine acceptable optical characteristics without the need to maintain the desired temperature. The main advantage of uncooled thermal detectors over cooled ones is the relative cheapness of manufacture. This also implies the main disadvantage - a decrease in sensitivity due to the effect of the ambient temperature on the device. Changing the thickness of the structural layers of the active elements of the microbolometric matrix is one of the most easily accessible ways to increase sensitivity. By modeling the absorption spectra and then calculating the integral absorption coefficient in the wavelength range from 8 to 14 μm , it was found that this coefficient increases from 60 to 81 % with a decrease in the thickness of the absorbing NiCr layer from 10 to 4 nm. The results obtained can be used to improve the optical characteristics of manufactured uncooled thermal detectors of the bolometric type.

Keywords: photodetector, reflective layer, optical resonator, sensitive element, IR range, integral absorption coefficient, heat capacity.

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

For citation. Zhamoit A. E., Solovjov Ja. A., Vidritskiy A. E. (2025) Calculation of the Integral Absorption Coefficient of the Sensitive Element of an Uncooled Thermal Detector of the Bolometric Type. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 29–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-29-34> (in Russian).

Введение

Фотоприемные устройства (ФПУ) находят широкое применение в различных областях деятельности человека, таких как космическая и военная промышленность, медицинское оборудование. Функционирование неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа обеспечивается в длинноволновой (Long Wavelength Infrared (LWIR), длина волны – от 8 до 14 мкм) области электромагнитного спектра [1–3].

Инфракрасное (ИК) излучение – это электромагнитные волны с длиной волны от 0,78 мкм до 1,00 мм. При попадании на поверхность металлической пленки или сплава происходит взаимодействие излучения с электронами материала. В металлах свободные электроны могут поглощать энергию ИК-излучения, что приводит к их возбуждению и последующему выделению тепловой энергии. Эффективность поглощения зависит от толщины пленки, оптических свойств материала и длины волны падающего излучения. Тонкие металлические пленки (толщиной от нескольких нанометров до микрометров) могут демонстрировать уникальные оптические свойства, отличающиеся от объемных материалов. Например, они могут быть частично прозрачными для ИК-излучения или иметь повышенное поглощение за счет интерференционных эффектов [4, 5].

Подвешенные структуры используют принцип изменения температуры чувствительного элемента при поглощении инфракрасного излучения. Это изменение температуры приводит к изменению электрических свойств материала (например, сопротивления), что позволяет регистрировать излучение. Толщина поглощающего слоя критична, поскольку должна быть достаточной для обеспечения эффективного поглощения ИК-излучения, но в то же время не слишком большой, чтобы избежать накопления тепла, что может привести к перегреву материала и его разрушению. Таким образом, оптимизация толщины поглощающего слоя является ключевым аспектом в разработке эффективных тепловых систем, использующих ИК-излучение.

Эквивалентная шумовая разность температур (NETD) – важный параметр для оценки качества функционирования ФПУ, особенно в инфракрасной области спектра. Более низкое значение NETD указывает на высокую чувствительность устройства, позволяя ему регистрировать меньшие разности температур.

Коэффициент поглощения материала играет ключевую роль в этом процессе. Высокий коэффициент поглощения позволяет более эффективно улавливать ИК-излучение, что, в свою очередь, способствует снижению NETD. Таким образом, материалы с большими значениями поглощения, такие как никель-хром (NiCr), являются предпочтительными для использования в ФПУ, поскольку обеспечивают минимальную теплоемкость и высокую чувствительность к изменениям температуры. NiCr обладает хорошими термическими свойствами и стабильностью, что делает его подходящим выбором для применения в инфракрасных детекторах, особенно когда речь идет о задачах, требующих высокой точности и чувствительности [6, 7].

В процессе исследований с целью получения максимальных значений выполнены моделирование спектров поглощения и последующий расчет интегрального коэффициента поглощения чувствительного элемента микроболометра в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм.

Методика проведения исследований

На рис. 1 показаны подвешенные структуры (пиксели), конструктивные слои которых исследуются в данной статье. Наличие отражающего слоя под чувствительным элементом критически важно для улучшения оптических характеристик ФПУ. Он создает резонансную микрополость, которая усиливает сигнал, обеспечивая более эффективное поглощение инфракрасного излучения. Расстояние между чувствительным элементом и отражающим слоем в одну четвертую длины волны обусловлено необходимостью создания резонансного эффекта, который максимизирует поглощение излучения с определенной длиной волны [8].

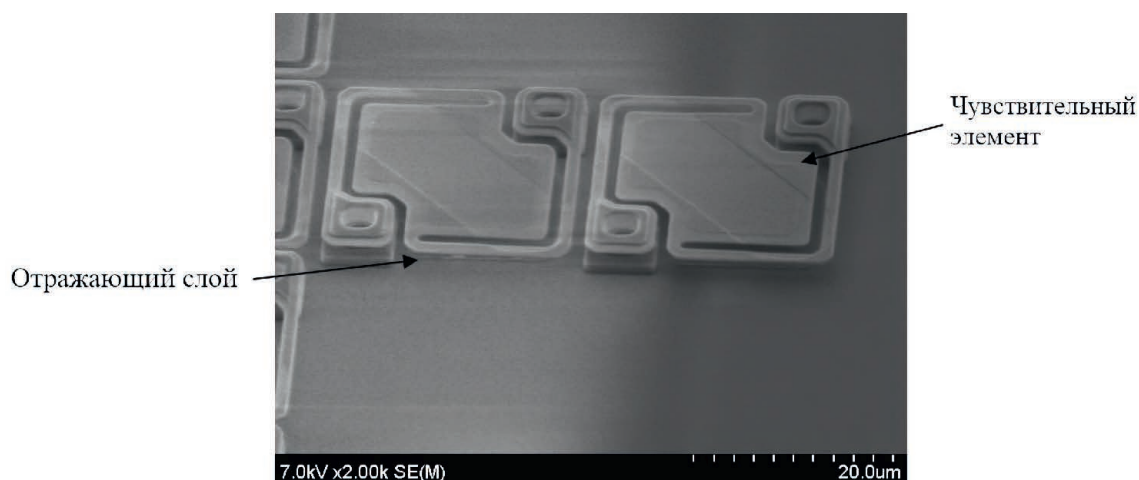


Рис. 1. Внешний вид подвешенной структуры (пикселя) фотоприемного устройства
Fig. 1. External appearance of the suspended structure (pixel) of the photodetector

Выбор вакуумного зазора в 2,5 мкм для диапазона длин волн от 8 до 14 мкм является следствием получения необходимых условий резонанса для эффективного поглощения инфракрасного излучения. Схематическое изображение конструктивных слоев чувствительного элемента, использованных при проведении исследования, приведено на рис. 2.

Защитный диэлектрик (SiN_x)
Теплопоглотитель (NiCr)
Несущий диэлектрик-2 (SiN_x)
Термочувствительный слой (VO_x)
Несущий диэлектрик-1 (SiN_x)
Вакуумный зазор (2,5 мкм)
Отражающий слой (Al)

Рис. 2. Структура чувствительного элемента микроболометра
Fig. 2. The structure of the sensing element of the microbolometer

Расчеты выполнялись только для области чувствительного элемента, где отсутствует токопроводящий слой из титана (Ti) толщиной 60 нм, который расположен между слоями «Несущий диэлектрик-1» и «Термочувствительный слой». Коэффициент поглощения падающего ИК-излучения в области с Ti не приводит к изменению температуры «Термочувствительного слоя» в достаточной степени, которую можно зарегистрировать ввиду быстрого теплоотвода в металлической пленке.

Оценка влияния толщины слоя «Теплопоглотитель» из NiCr на поглощение чувствительного элемента проводилась для четырех вариантов структуры: 10, 7, 4 и 2 нм. При этом толщины слоев «Несущий диэлектрик-1», «Несущий диэлектрик-2», «Защитный диэлектрик» составляли 70 нм. Толщина «Термочувствительного слоя», состоящего из оксида ванадия, – 100 нм.

Для моделирования спектров поглощения ИК-излучения чувствительным элементом использовалась система COMSOL Multiphysics. Расчет выполнялся для диапазона длин волн от 8 до 14 мкм с использованием метода конечных разностей во временной области [9]. Данный способ проведения расчетов является эффективным подходом к решению уравнений Максвелла, позволяя с приемлемой точностью моделировать оптические параметры поглощения, пропускания и отражения во всем исследуемом спектре за один расчет.

Для получения работоспособной модели чувствительного элемента в САПР COMSOL Multiphysics необходимо задание оптических постоянных n и k . Их расчет проводился путем из-

мерения коэффициентов пропускания и поглощения на ИК-Фурье-спектрометре Vertex 70 изготовленных экспериментальных образцов с единичными пленками слоев, из которых формировался термочувствительный элемент. Такой способ получения необходимой модели позволяет утверждать о достаточной степени достоверности результатов.

После получения спектров поглощения проведен расчет интегрального коэффициента поглощения для совокупной оценки эффективности оптической системы в исследуемом диапазоне длин волн.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 3 приведены результаты моделирования спектров поглощения исследуемых структур в диапазоне длин волн λ от 8 до 14 мкм.

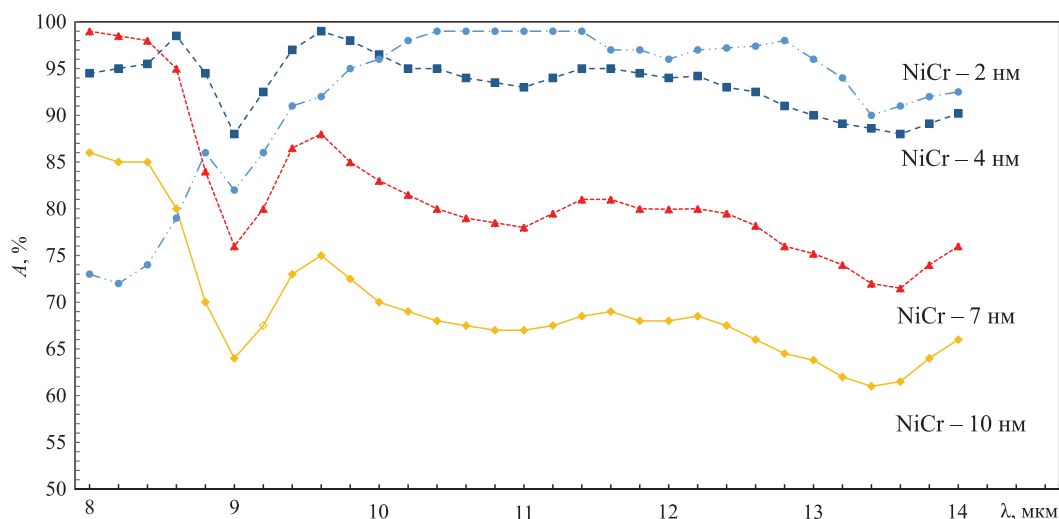


Рис. 3. Результаты моделирования спектров поглощения
Fig. 3. Simulation results of absorption spectra

Из рис. 3 видно, что при уменьшении толщины поглощающего слоя из NiCr с 10 до 2 нм в диапазоне λ от 10 до 14 мкм происходит увеличение поглощения ИК-излучения чувствительным элементом пикселя. При этом с уменьшением толщины NiCr с 7 до 4 нм и с 4 до 2 нм уменьшается поглощение в диапазоне длин волн от 8,0 до 8,8 мкм и от 8 до 10 мкм соответственно, что обусловлено увеличением коэффициента пропускания ИК-излучения A через многослойную структуру.

Для комплексной оценки поглощения исследуемых структур в рассматриваемом диапазоне длин волн проводился расчет интегрального коэффициента поглощения, результаты которого представлены на рис. 4.

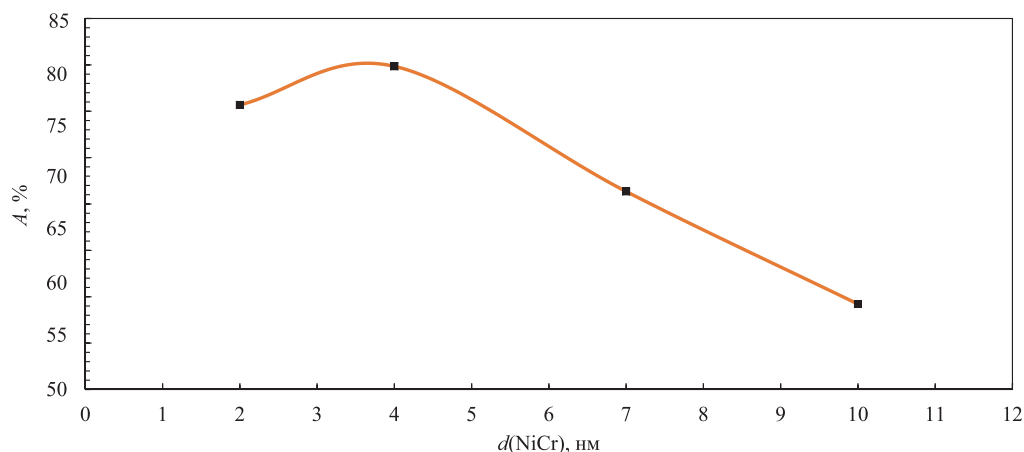


Рис. 4. Результаты расчета интегрального коэффициента поглощения
Fig. 4. The results of the calculation of the integral absorption coefficient

Из рис. 4 видно, что при уменьшении толщины d слоя «Теплопоглотитель» из NiCr с 10 до 4 нм происходит увеличение коэффициента поглощения ИК-излучения A в исследуемом диапазоне длин волн с 60 до 81 %. При этом дальнейшее уменьшение толщины до 2 нм, приводит к уменьшению коэффициента поглощения до 76 %.

Заключение

1. Исследовано влияние толщины слоя из NiCr на поглощение инфракрасного излучения чувствительным элементом пикселя фотоприемного устройства. Для расчета оптических постоянных n и k измерялись коэффициенты отражения и пропускания экспериментальных образцов единичных пленок, из которых формировался чувствительный элемент. Получены спектры поглощения для диапазона длин волн от 8 до 14 мкм.

2. Расчетным путем установлено, что уменьшение толщины поглощающего слоя NiCr с 10 до 4 нм приводит к увеличению интегрального коэффициента поглощения падающего инфракрасного излучения на чувствительный элемент пикселя с 60 до 81 %.

Список литературы

1. Микроболометрический детектор, чувствительный в двух спектральных диапазонах / С. А. Жукова [и др.] // Прикладная физика. 2016. Т. 4. С. 67–72.
2. Оптимальное проектирование МЭМС-элемента приемника ИК изображения на основе термопары / С. А. Федирко [и др.] // Проблема разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2016: тр. VII Всерос. науч.-техн. конф. 2016. Т. 4. С. 59–64.
3. Матричные микроболометрические приемники для инфракрасного и терагерцового диапазонов / М. А. Демьяненко [и др.] // Оптический журнал. 2009. Т. 76, вып. 12. С. 5–11.
4. Неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники ИК излучения на основе золь-гель VO_x / В. Н. Овсяк [и др.] // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 114–117.
5. Зверев, В. А. Оптические материалы. Часть 2 / В. А. Зверев, Е. В. Кривоустова, Т. В. Точилина. СПб.: НИУ ИТМО, 2013.
6. Рогальский, А. Инфракрасные детекторы / А. Рогальский; пер. с англ. А. В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003.
7. Uncooled Thermal MWIR Imagers for High-Temperature Imaging Applications / M. Michel [et al.] // Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XX. 2023.
8. Smith, P. W. A Bistable Fabry-Perot Resonator / P. W. Smith, E. H. Turner // Applied Physics Letters. 1977. Vol. 30, No 6. P. 280–281.
9. Finite-Difference Time-Domain Methods / F. L. Teixeira et al.] // Nat Rev Methods Primers. 2023. Vol. 3.

Поступила 28.02.2025

Принята в печать 09.04.2025

References

1. Zhukova S. A., Turkov V. E., Demin S. A., Troshin B. V. (2016) Microbolometer Detector That is Sensitive in Two Spectral Bands. *Applied Physics*. 4, 67–72 (in Russian).
2. Fedirko V. A., Hafizov R. Z., Fetisov E. A. (2016) Optimal Design of MEMS Thermopile Element for IR Imager Array. *The Problem of Developing Promising Micro- and Nanoelectronic Systems – 2016, Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference*. 4, 59–63 (in Russian).
3. Demyanenko M. A., Isaev D. G., Avsiuk V. N., Fomin B. I., Aseev A. L., Knyazev B. A., et al. (2009) Matrix Microbolometric Receivers for Infrared and Terahertz Ranges. *Optical Journal*. 76 (12), 5–11 (in Russian).
4. Ovsyuk V. N., Shashkin V. V., Demyanenko M. A., Fomin B. I., Vasilyeva L. L., Soloviev A. P. (2005) Uncooled Microbolometric IR FPA Based on Sol-Gel VO_x . *Applied Physics*. (6), 114–117 (in Russian).
5. Zverev V. A., Krivopustova E. V., Tochilina T. V. (2013) *Optical Materials. Part 2*. Saint Petersburg, ITMO Research Institute (in Russian).
6. Rogalsky A. (2003) *Infrared Detectors Translated from English by A. V. Wojciechowski*. Novosibirsk, Nauka Publ. (in Russian).
7. Michel M., Blaesser S., Litke A., Zakizade E., Weyers S., Weiler D. (2023) Uncooled Thermal MWIR Imagers for High-Temperature Imaging Applications. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XX*.
8. Smith P. W., Turner E. H. (1977) A Bistable Fabry-Perot Resonator. *Applied Physics Letters*. 30 (6), 280–281.

9. Teixeira F. L., Sarris C., Yisong Zhang, Dong-Yeop Na, Berenger J.-P., Su Y., et al. (2023) Finite-Difference Time-Domain Methods. *Nat Rev Methods Primers*. 3.

Received: 28 February 2025

Accepted: 9 April 2025

Вклад авторов

Жамойть А. Е., Видрицкий А. Э. провели исследование и анализ полученных результатов под научным руководством Я. А. Соловьёва.

Authors' contribution

Zhamoit A. E., Vidritskiy A. E. conducted a study and analysis of the results obtained under the scientific supervision of Ja. A. Solovjov.

Сведения об авторах

Жамойть А. Е., вед. инж. отрасл. лаб. новых технологий и материалов науч.-технич. центра, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компании холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

Соловьёв Я. А., д-р. техн. наук, доц., зав. отрасл. лаб. новых технологий и материалов, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Видрицкий А. Э., вед. инж. отрасл. лаб. новых технологий и материалов науч.-технич. центра, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
Минск, ул. Корженевского, 16, каб. 247
ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Тел.: +375 29 198-59-49
E-mail: AZhamoit@integral.by
Жамойть Александр Евгеньевич

Information about the authors

Zhamoit A. E., Leading Engineer of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials Scientific and Technical Center, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”)

Solovjov Ja. A., Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials, JSC “INTEGRAL”

Vidritskiy A. E., Leading Engineer of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials Scientific and Technical Center, JSC “INTEGRAL”

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Korzhenevskogo St., 16, Off. 247
JSC “INTEGRAL” –
Manager Holding Company “INTEGRAL”
Tel.: +375 29 198-59-49
E-mail: AZhamoit@integral.by
Zhamoit Aleksander Evgen'evich