УДК 621.384.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ПИКСЕЛЯ

Левчук Д.С.[1], Соловьёв Я.А.[1], Видрицкий А.Э.[1], Стемпицкий В.Р.[2]

[1] ОАО «ИНТЕГРАЛ» -управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь, DLevchuk@integral.by

[2] Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: в данной работе проведен расчет оптических характеристик многослойных структур микроболометрического пикселя методом конечных элементов. Исследованы такие параметры, как пропускание, поглощение и отражение ИК-излучения в диапазоне длин волн 8–12 мкм.

Ключевые слова: неохлаждаемый тепловой детектор болометрического типа, микроболометр, чувствительный элемент, моделирование, поглощение, LWIR.

I. ВВЕДЕНИЕ

Все нагретые тела, имеющие температуру отличную от абсолютного нуля, излучают энергию (лучистая энергия). Это излучение называется тепловым, т.к. вызвано превращением тепловой энергии колебательных и вращательных движений молекул, а также при переходе электронов внешней орбиты атомов с одного уровня на другой в энергию излучения [1].

Выделяют четыре области прозрачности атмосферы в ИК-области, где излучение слабо поглощается и рассеивается:

– ближний ИК диапазон (Near - infrared (NIR)) - 0,72 ÷ 1,1 мкм,

– коротковолновый ИК диапазон (Short-wave infrared (SWIR)) - 1,2 ÷ 2,5 мкм,

– средневолновый ИК диапазон (Mid-wave infrared (MWIR)) - 3 ÷ 5 мкм,

– длинноволновый ИК диапазон (Long-wave infrared (LWIR)) - 8 ÷ 14 мкм.

Регистрация ИК-излучения в длинноволновом диапазоне LWIR осуществляется с помощью фотоприемного устройства, построенного на основе матрицы микроболометров. Микроболометр является тепловым приёмником, рабочий элемент реагирует на изменение температуры, вызванное поглощённой электромагнитной энергией [2]. Матрица таких элементов формирует двумерный массив пикселей, каждый из которых преобразует локальный тепловой поток в электрический сигнал, что в совокупности позволяет получать пространственное распределение температуры.

Отдельный термочувствительный пиксель микроболометра представляет собой сложную многослойную структуру, которая включает поглощающий слой, термочувствительный резистивный элемент, теплоизолирующую мембрану, подвешенную над подложкой на тонких опорных «ножках», а также отражающий элемент, образующий оптический резонанс. Такая архитектура обеспечивает одновременно высокое поглощение ИК-излучения, низкую теплопроводность связи с подложкой и, как следствие, высокую температурную чувствительность пикселя (рис 1).

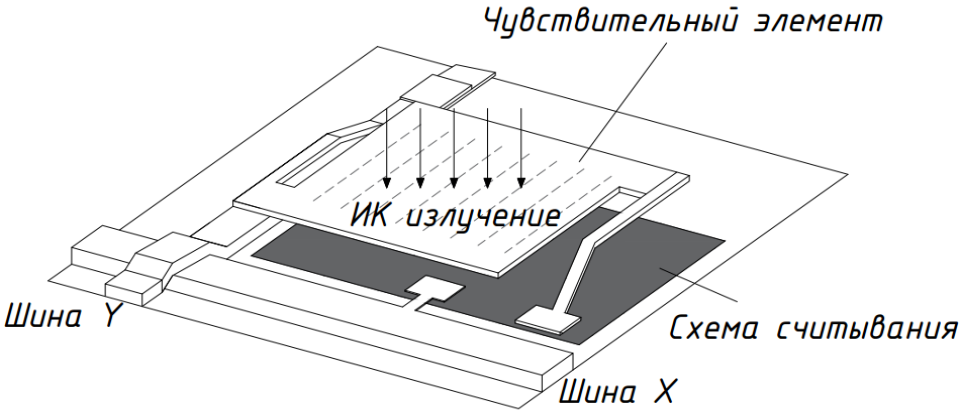


Рисунок 1. Конструкция термочувствительного пикселя микроболометра [3]

Для получения требуемых характеристик пикселя необходимо, максимальное оптическое поглощение структуры пикселя в ИК диапазоне от 8 до 12 мкм, минимизация и, по возможности, исключение деформаций многослойных трехмерных структур под воздействием внутренних остаточных напряжений и температуры, оптимальное соотношение тепловой массы поглощающей части и термоизолирующего резистора (подвеса) пикселя для обеспечения чувствительности, быстродействия и шумовых характеристик.

II. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТА

Расчет оптических спектров поглощения, отражения и рассеивания, для микроболометрического пикселя размером 25 мкм проводился в САПР «COMSOL Multiphysics» при помощи встроенных модулей «Electromagnetic Waves, Frequency Domain», «Wavelength Domain» [4].

Для верификации разработанной модели, были приняты следующие допущения:

- в экспериментальных структурах заменили воздушный зазор на твердый материал с приемлемой оптической пропускной способностью в среднем ИК-диапазоне (длина волны от 3 до 50 мкм), SiN_X;

- для эталонных структур сопоставили расчетные данные с данными непосредственных измерений на Фурье-спектрометре;

- получение приемлемой сходимости расчетных данных с результатами измерений образцов, означало, что и для реальных структур с воздушным зазором модель будет так же достоверна.

Для оценки корректности полученной модели, в САПР «COMSOL Multiphysics» были выполнены расчеты коэффициентов поглощения многослойных структур с толщинами, используемых на экспериментальных образцах. Последовательность слоев, используемая для расчетов, представлена на рис. 2.



Рисунок 2. Последовательность конструктивных слоёв активной области микроболометрического пикселя

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектр поглощения микроболометрической структуры с имитацией вакуумного зазора и результаты измерений на Фурье-спектрометре представлены на рис. 3.

Из рис. 3 экспериментальная и рассчитанная структура микроболометрического пикселя имеет максимальное расхождение до 10 %. Провал на 9 мкм обусловлен наличием кислородной среды при изучение тонких пленок на Фурье-спектрометре и последующим определением коэффициентов n и k методом Ньютона – Рафсона.

Исходя из результатов сравнения измеренных и рассчитанных значений многослойных структур коэффициента поглощения, следует вывод о возможности проведения в достаточной степени достоверных расчётов коэффициентов поглощения структур термочувствительной ячейки микроболометрического пикселя в САПР «COMSOL Multiphysics». На основе результатов был рассчитан спектр поглощения активной области микроболометрического пикселя с наличием вакуумного зазора рис. 4.

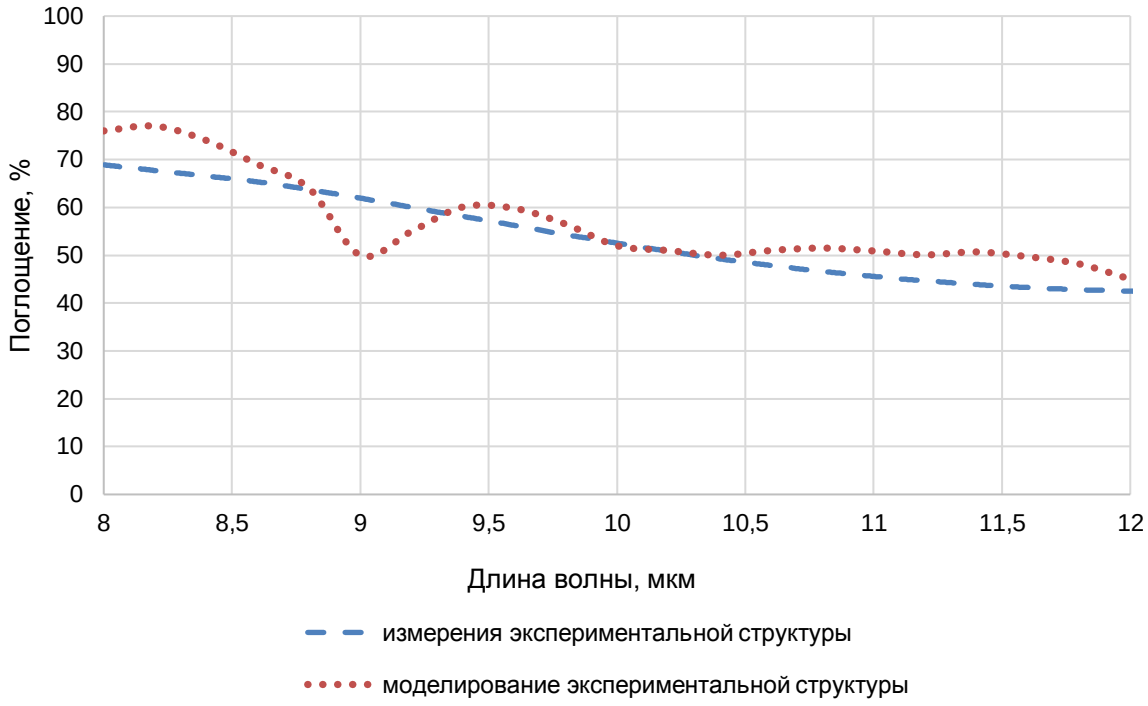


Рисунок 3. Результаты моделирования и верификации микроболометрической структуры

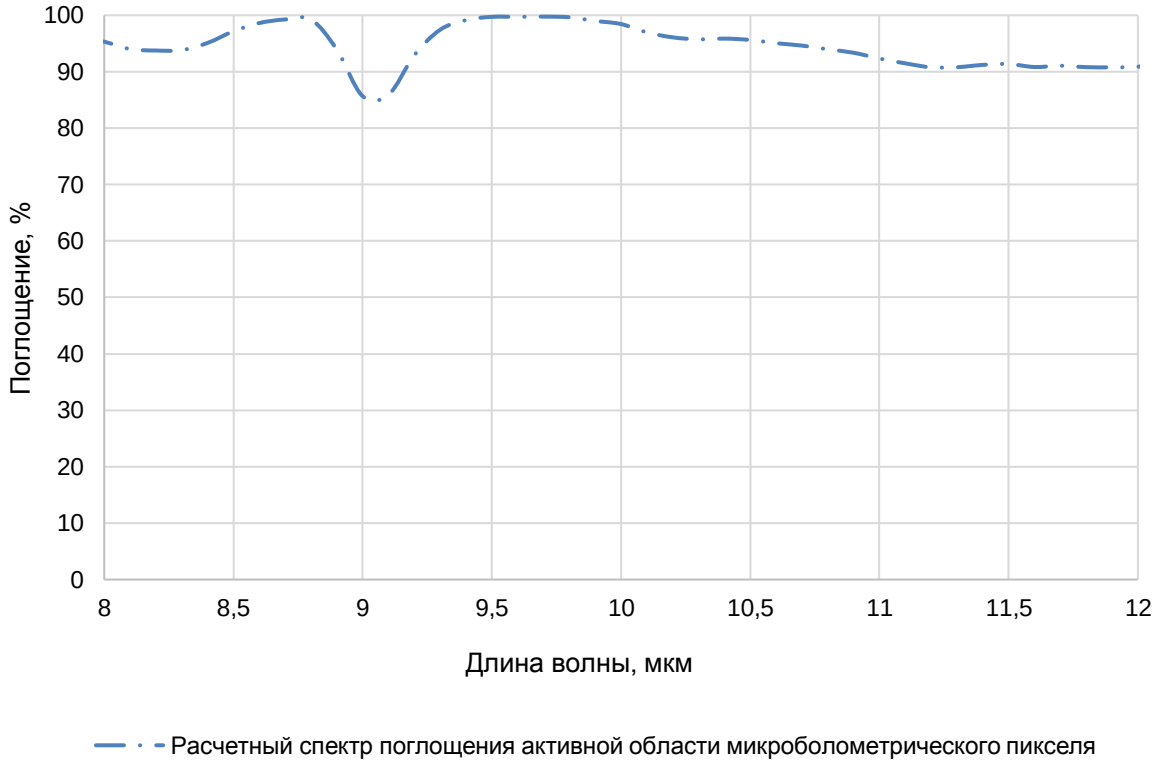


Рисунок 4. Результаты моделирования микрометрической структуры с вакуумным зазором

Исходя из результатов компьютерных расчётов, спектр поглощения активной области микроболометрического пикселя лежит в пределах от 90 до 100 %, что обеспечивает сбалансированную спектральную характеристику. Среднее поглощение для диапазона длин волн 8 -14 мкм составило 92%.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена компьютерная модель оптических спектров поглощения, отражения и рассеивания микроболометрического пикселя с твердотельным зазором между пикселем и подложкой. Проведена верификация расчета с экспериментальной структурой. Коэффициент расхождения экспериментальной и рассчитанной структуры составил до 10 %. Рассчитана активная область микроболометрического пикселя процент поглощения для диапазона длин волн 8 - 12 мкм составил от 90 до 99 %, среднее значение поглощения 92 %. САПР «COMSOL Multiphysics» позволяет проводить расчеты спектров отражения, поглощения и пропускания для многослойных тонкопленочных структур.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Большая российская энциклопедия 2004–2017, электронная версия https://old.bigenc.ru/physics/text/3143472

[2] Web of Science. – URL: https://www.sensorsinc.com/technology/swir-and-the-u-2/ (дата обращения 03.08.2026)

[3] Tempelhahn, A. Shutter-less calibration of uncooled infrared cameras / A. Tempelhahn, H. Budzier, V. Krause, G. Gerlach // Journal of Sensors and Sensor Systems. – 2016. – Vol. 5. – P. 9–16. – DOI 10.5194/jsss-5-9-2016.

[4] Левчук, Д. С. Моделирование зависимости спектра поглощения микроболометрического пикселя от высоты вакуумного зазора в САПР «COMSOL Multiphysics» / Д. С. Левчук, В. Ю. Клыбик, А. Н. Фундаренко, А. Е. Жамойть, Я. А. Соловьёв // XXVIII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и системам технического зрения (Москва, 27–29 мая 2026 г.). – Москва, 2026.

MODELING AND VERIFICATION OF THE COMPUTER CALCULATION OF THE ABSORPTION COEFFICIENT OF A MICROBOLOMETRIC PIXEL

D. Liauchuk[1], Ya. Solovjov[1], A. Vidrytski[1], V. Stempitsky[2]

[1] JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, Minsk, Belarus, DLevchuk@integral.by

[2] Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Abstract: this paper presents the calculation of the optical characteristics of multilayer structures of a microbolometric pixel using the finite element method. Parameters such as transmission, absorption, and reflection of IR-radiation in the wavelength range of 8–12 μm are studied.

Keywords: uncooled bolometric-type thermal detector, microbolometer, sensitive element, modeling, absorption, LWIR.