

Проектирование термодатчиков с повышенным быстродействием на основе структур кремний на изоляторе

Р.З. Хафизов

ООО «ГрафИмпресс», Москва, imagelab@mail.ru

Аннотация — Проведены теоретическая оценка и аналитическое моделирование теплофизических параметров термодатчиков с учетом требований по размерам датчиков, их чувствительности и постоянной времени тепловой релаксации. Определены основные соотношения конструктивных элементов чувствительных ячеек с учетом характеристик технологических слоев, входящих в структуру мембран. Полученные результаты использованы в качестве исходных данных для топологического проектирования датчиковых элементов, и матричных массивов на их основе. Проведено проектирование топологии кристаллов с термодатчиками сенсорами с учетом возможностей технологического оборудования (нормы проектирования 0,8 мкм).

Ключевые слова — ИК приемник, микро-электро-механическая система (МЭМС), фотоприемное устройство (ФПУ), термоэлектрический эффект, эффект Зеебека, микротермопара, термодатчик, структура кремний на изоляторе (КНИ), эквивалентная шуму разность температур, постоянная времени тепловой релаксации.

I. ВВЕДЕНИЕ

Потенциальные возможности современной кремниевой технологии позволяют использовать для регистрации ИК излучения неохлаждаемые тепловые датчики, в основе работы которых лежат различные физические эффекты. Ведущими мировыми электронными компаниями предпринимаются серьезные усилия по постановке и проведению исследований и разработок с целью определения наиболее эффективных путей реализации таких датчиков. Среди них можно выделить результаты исследований, позволившие создать многоэлементные ИК приемники с тепловыми МЭМС датчиками, функционирование которых основано на использовании термоэлектрического эффекта [1,2].

В технологии создания всех типов тепловых датчиков используются МЭМС процессы, обеспечивающие возможность изготовления наноразмерных диэлектрических мембран с покрытиями, эффективно поглощающими ИК излучение. Мембраны подвешены над кремниевой подложкой на консолях, слабо проводящих тепло, и благодаря этому имеют хорошую тепловую изоляцию. Обладая малой тепловой массой, они способны быстро нагреваться под действием ИК излучения. Важнейшее

преимущество процессов изготовления МЭМС-структур состоит в том, что они приемлемо вписываются в стандартную КМОП кремниевую технологию.

Количественная оценка эффективности тепловых датчиков осуществляется с помощью показателя качества (FOM – Figure of Merit) [3], который представляет собой произведение эквивалентной шуму разности температур (NETD – Noise Equivalent Temperature Difference) и его постоянной времени тепловой релаксации τ_r . NETD характеризует чувствительность прибора, а τ_r – время реакции на изменение теплового рельефа в фокальной плоскости фотоприемного устройства (ФПУ) и степень размытия изображения движущихся объектов. Ясно, чем меньше FOM, тем лучше датчик. Однако, тепловой механизм преобразования ИК излучения не позволяет одновременно эффективно уменьшать как NETD, так и τ_r . Поэтому при проектировании матричных тепловых детекторов необходимо учитывать их целевое назначение. Высокая чувствительность необходима для решения задач высокочувствительного детектирования низкоконтрастных целей на большей дальности, в то время как низкие значения τ_r существенны для применений, где требуется фиксация быстро изменяющихся событий, например, для использования в аппаратуре, предназначенной для пеленгации высокоскоростных тепловых объектов, которые, как правило, характеризуются и высокой излучательной способностью в ИК области спектра. Поэтому сегодня целый ряд работ посвящен решению задач снижения τ_r для повышения быстродействия тепловых матричных детекторов и поиска возможностей улучшения их дизайна и технологии, обеспечивающих не слишком критическое ухудшение чувствительности, обусловленное уменьшением τ_r [4-5].

Необходимые для конкретных применений значения τ_r обеспечиваются выбором конструктивных, теплофизических и фотоэлектрических параметров датчиковых структур и реализуются в процессе отработки технологии их изготовления [6-7]. В предлагаемой работе на основе теплофизического анализа определены основные конструктивные параметры МЭМС термодатчиков со структурой КНИ, обеспечивающие возможность реализации постоянной времени тепловой релаксации до 1,5-2 мс с целью повышения кадровой частоты

матричных ИК детекторов на их основе до 150-200 Гц. Полученные оценки легли в основу проектирования сенсоров и многоэлементных ИК приемников на их основе с использованием проектных норм 0,8 мкм.

II. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

На рисунке 1 схематически изображена термопара, состоящая из двух плеч из поликристаллического кремния с различным типом проводимости, соединенных на одном конце, который называют теплым спаем. При нагревании этого спаја на других концах термопары создается разность потенциалов, зависящая от параметров материалов и разности температур между теплым спаєм и холодными концами термопары.

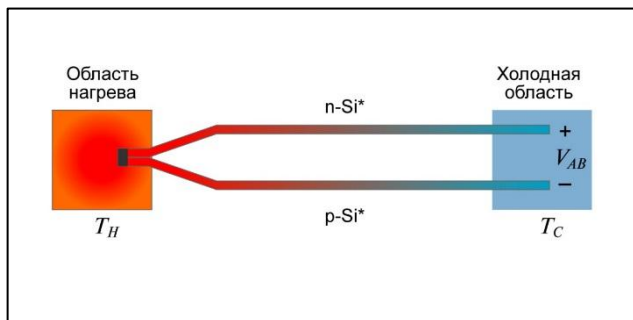


Рис. 1. Схематическое изображение термопары

Возникающая термоЭДС описывается следующим соотношением:

$$V_{AB} = \alpha_T \Delta T = (\alpha_{pSi^*} - \alpha_{nSi^*})(T_H - T_C),$$

где α_{pSi^*} и α_{nSi^*} — коэффициенты Зеебека поликремния n и p -типа, соответственно, α_T — коэффициент Зеебека термопары, T_H и T_C — температуры теплового и холодного концов термопары.

В микротермопарных ИК МЭМС сенсорах, используемых на практике, с целью увеличения выходного напряжения несколько термопар соединяют последовательно, создавая термоэлектрическую батарею.

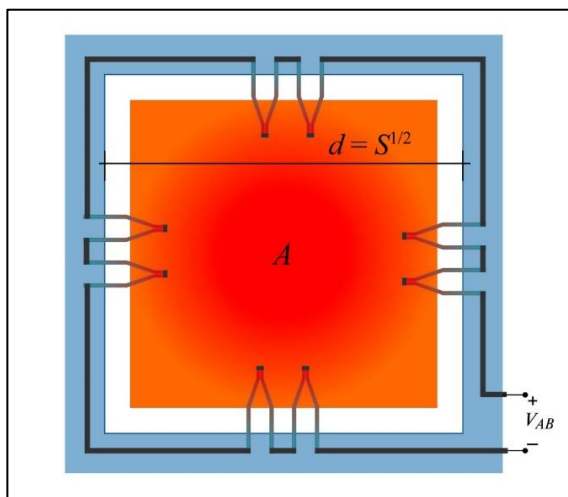


Рис. 2. Термоэлектрическая батарея

Теплые спаи такой батареи размещают на тонкой диэлектрической мембране с хорошим поглощением теплового излучения. Холодные концы термопар выводятся на подложку с большой термоинерционной массой, которая имеет постоянную (слабо меняющуюся) температуру.

С целью достижения максимальной разности температур между теплым и холодным концами термопар и, соответственно, получения высокого выходного напряжения, необходимо обеспечить хорошую термическую изоляцию диэлектрической мембраны, воспринимающей тепловое излучение. Один из способов снижения тепловых утечек состоит в вытравливании «жертвенного» окисла между мембраной и подложкой. В результате этой операции мембрана подвешивается над подложкой на узких консолях на высоте порядка микрометра. На этих консолях размещаются и тонкие слои материалов, формирующие термопары. Для минимизации тепловых утечек слои материалов, которые используются для создания термопар, должны обладать низкой теплопроводностью.

Структура КНИ, как основа для создания микротермопарного сенсора, дает возможность использования в качестве жертвенного слоя приборный слой кремния. Изолирующие вертикальные канавки (Deep Trench Isolation) и слой скрытого диэлектрика (SiO_2 – BOX) КНИ структуры, обладая высокой селективностью травления по отношению к кремнию, позволяют эффективно сформировать полость под мембраной и несущими консолями. При этом мембрану и консоли можно сформировать из диоксида кремния, обладающего низкой теплопроводностью, а в качестве слоя, обеспечивающего эффективное поглощение ИК излучения, может быть использован слой нестехиометрического нитрида кремния [8]. Эффективно также использование золотой черни [9], которая обладает высоким поглощением в широком спектральном диапазоне и характеризуется низкой теплоемкостью, что важно для обеспечения низкого уровня шума и малого времени тепловой релаксации. Как показывают результаты ряда исследований, перспективны также пленки метаматериалов, в частности, пленки плазмонных поглотителей со структурой металл-изолятор-металл (MIM), которые позволяют достичь высокого (практически до 100%) поглощения ИК излучения и сформировать за счет конструктивно-технологических параметров структуры необходимый спектральный диапазон поглощения ИК излучения с возможностью создания двухспектральных сенсорных элементов [10],

С целью исследования зависимости параметров термопарных сенсоров рассмотрим следующую конструкцию чувствительной ячейки: на мембране из SiO_2 площадью A расположены N «горячих» спаев термопар с плечами из $pSi^* - nSi^*$. Другой спай каждой из термопар расположен на подложке из кремния, которая выполняет роль резервуара с постоянной температурой. Мембрана

теплоизолирована от подложки и соединена с ней посредством консолей из SiO_2 на которых расположены плечи термопар. Поскольку теплопроводность SiO_2 много меньше теплопроводности поликристаллического кремния (см. таблицу 1.1), можно считать, что остывание мембраны происходит только за счёт теплоотвода через плечи термопар шириной w_t . Термопары соединены последовательно на стороне «холодных» спаев. При этом считаем, что коэффициент Зеебека одной термопары равен α_T , то есть термоЭДС термопары равна $\alpha_T \Delta T$, где ΔT – разность температур между «холодным» и «горячим» спаем термопары. Для коэффициента Зеебека одной термопары принимаем значение $\alpha_T = 300$ мкВ/К.

Для оценок используем следующие параметры слоев мембраны

Таблица 1

Слой	Толщина слоя h , см	Удельная теплопроводность g , Вт/см·К	Удельная теплоемкость c_v [Дж/см ³ К]
SiN_x	$6 \cdot 10^{-5}$	0,2	1,8
SiO_2	10^{-5}	0,01	1,9
Si^*	$5 \cdot 10^{-5}$	0,25	1,9

Теплоемкость элемента определяется теплоемкостью несущего слоя SiO_2 мембраны и поглощающего слоя SiN_x . С учетом параметров этих слоев суммарная теплоемкость мембраны C_m площадью 100×100 мкм² составит:

$$C_m = (c_{SiO_2} h_{SiO_2} + c_{SiN_x} h_{SiN_x}) A = 1,3 \cdot 10^{-4} A \text{ [Дж/К]},$$

где A выражено в см².

Теплопроводность N термопар составляет:

$$G_t = 2g_{Si^*} w_t h_{Si^*} \frac{N}{L_t} \text{ [Вт/К]}$$

Оценим длину термопар шириной $w_t = 2 \cdot 10^{-4}$ см (ограничена проектными нормами 0,8 мкм) при их количестве N для площади мембраны A , обеспечивающую постоянную времени тепловой релаксации $\tau_r = 2$ мс.

Длину плеча термопары L_t для N термопар определяем из соотношения:

$$\tau_r = \frac{C_m}{G_t} = \frac{1,3 \cdot 10^{-4} A}{g_{Si^*} \frac{w_t h_{Si^*} N}{L_t}},$$

$$\text{соответственно, } L_t = \frac{\tau_r}{C_m} 2N g_{Si^*} w_t h_{Si^*} = 7,7 \cdot 10^{-8} \frac{N}{A} \text{ [мкм]},$$

где A выражено в см².

При облученности элемента ΔI его термоЭДС составит:

$$\Delta V = N \alpha \Delta T = N \alpha \Delta I \frac{A}{G_t}$$

Принимая в качестве основного вклада в шумовые характеристики сенсора его тепловой шум, можно записать для флуктуаций термоЭДС:

$$V_N = \sqrt{4kT \Delta f R_t},$$

где R_t – сопротивление термопар, пропорциональное L_t и N , Δf – полоса частот, пропорциональная τ_r^{-1} .

Из полученных соотношений следует, что при заданной чувствительной площади A сенсора и выбранных значениях толщины и ширины термопар:

- при неизменной длине L_t увеличение количества термопар не оказывает влияния на величину термоЭДС, так как при этом пропорционально растут тепловые утечки,

- постоянная времени тепловой релаксации зависит от отношения $\frac{L_t}{N}$,

- шум сенсора не зависит от L_t и увеличивается с увеличением количества термопар пропорционально N .

Таким образом, выполняя проектирование сенсора с целью минимизации его постоянной времени тепловой релаксации, можно воспользоваться приемом, при котором с увеличением длины L термопар следует сохранять постоянным отношение $\frac{L}{N}$. При этом термоЭДС и шум будут расти пропорционально N , а показатель качества, пропорциональный произведению отношения сигнал/шум на постоянную времени тепловой релаксации, не будет изменяться.

Вместе с тем, реализовать повышенные уровни сигнала важно, поскольку это снижает требования к усилению сигнала до уровня, который обеспечивает превышение собственных (тепловых) шумов сенсора над шумами, возникающими при считывании сигнала.

На рисунке 3 представлены расчетные релаксационные характеристики термопарного сенсора с чувствительной площадью $A = 100$ мкм², оптимизированного для достижения постоянной времени тепловой релаксации $\tau_r = 2$ мс.

Увеличение количества термопар при сохранении времени тепловой релаксации и связанное с этим увеличение уровня выходного сигнала позволяет снизить требования к усилению сигнала до уровня, который обеспечит превышение собственных (тепловых) шумов сенсора над шумами, возникающими при считывании сигнала и реализовать таким образом предельную чувствительность для заданного быстродействия.

Так, как видно из графика на рисунке 3, при увеличении количества термопар в два раза (до 8-ми по отношению к $N = 4$), выходной сигнал пропорционально увеличился в 2 раза.

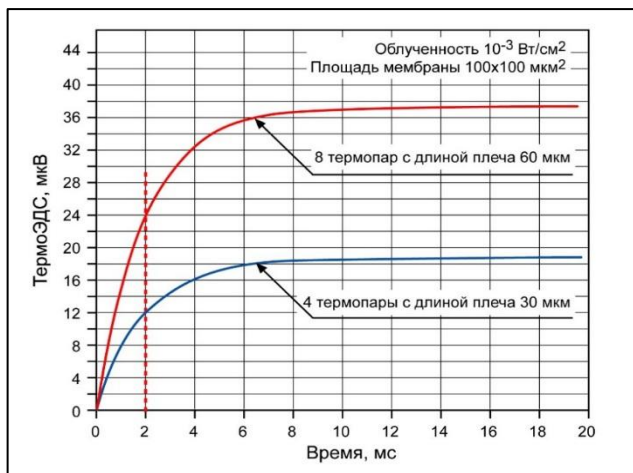


Рис. 3. Релаксационные кривые отклика сенсора, оптимизированного для достижения постоянной времени тепловой релаксации $\tau_r = 2$ мс

III. ПРОЕКТИРОВАНИЕ

С учетом выполненных оценок проведено проектирование нескольких вариантов МЭМС элементов с микротермопарами и матриц на их основе.

На рисунке 4 представлена топология базового термопарного сенсора площадью теплочувствительной мембраны $100 \times 100 \text{ мкм}^2$, и фрагмент матричного массива 2×8 на основе этого сенсора.

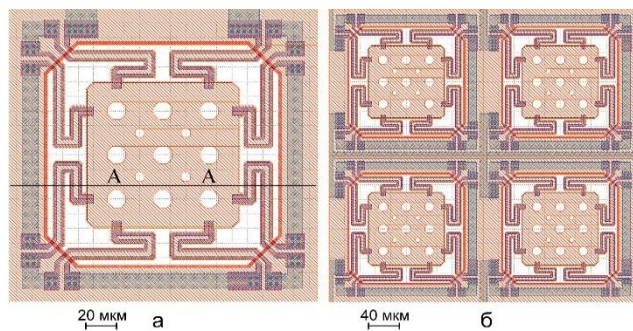


Рис. 4. Пример топологий: (а) базового термопарного сенсора площадью теплочувствительной мембраны $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ и (б) фрагмента матричного массива с числом элементов 2×8 на основе этого сенсора

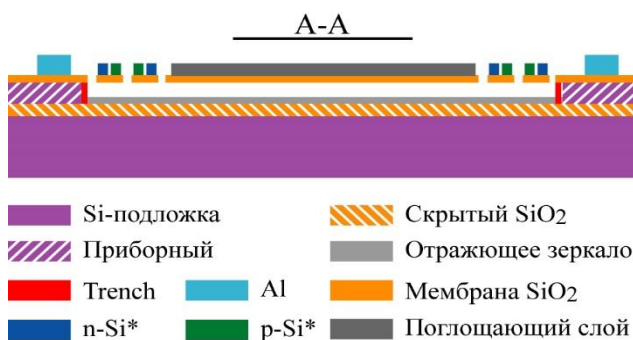


Рис. 5. Схематическая структура слоев термопарного сенсора по сечению А-А рисунка 4

Топология сенсоров оптимизирована с целью достижения постоянной времени тепловой релаксации не более 2-х мс. Для получения повышенных значений выходного сигнала в состав каждого сенсора включены восемь термопар. Для сенсора с площадью мембраны $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ ширина поликремниевых плеч термопар составляет 2 мкм, а их длина, соответственно, – 70 мкм. Аналогичные значения для термопарных плеч сенсора с площадью мембраны $50 \times 50 \text{ мкм}^2$ равны, соответственно, 1 мкм и 35 мкм.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достижение малых значений постоянной времени тепловой релаксации тепловых сенсоров отвечает актуальным запросам разработчиков современной теплолегиционной аппаратуры по увеличению быстродействия инфракрасных оптико-электронных систем (ОЭС). Предложенные в работе подходы по оптимизации конструкции термопарных МЭМС сенсоров позволяют существенно снизить этот параметр. Использование для создания сенсоров структур КНИ открывает возможности эффективного формирования несущей диэлектрической мембраны, представляющей собой основной элемент МЭМС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Хафизов Р.З. Многоэлементные ИК МЭМС-сенсоры с термопарными преобразователями теплового излучения // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2014. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2014. Часть 2. С. 193-196.
- [2] V.A. Fedirko, E.A. Fetisov, R.Z. Khafizov, G.A. Rudakov, A.A. Sigarev. Thermopile IR Sensor Arrays // Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development - 2016", 14–15 December 2016, Moscow, Russia, pp. 39-48. doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7_5.
- [3] Dennis L. Waldron and Dieter J. Lohrmann. Per-Pixel Time Constant Measurement of Bolometer Cameras, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, April 2020. doi: 10.1109/TIM.2020.2985138
- [4] S. Tinnes, N. Boudou, A. Durand. Ulis Bolometer Improvements for Fast Imaging Applications, OECD Conference Center, Paris, France / 6 – 8 February, 2018.
- [5] С. А. Демин, Б. В. Трошин, С. А. Жукова, В. Е. Турков, Быстродействующий широкодиапазонный инфракрасный микроболометрический детектор, Патент RU 2574524 C1, 15.12.2014.
- [6] R.Z. Khafizov, V.V. Startsev, V.Y. Moskvichev. Bolometric Focal Plane Arrays with High Operating Speed // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2021, Vol. 57, No. 5, pp. 511–520. doi: 10.3103/S8756699021050071.
- [7] Р.З. Хафизов, В.В. Старцев, В.Ю. Москвичев. Быстродействующие болометрические матричные детекторы // Фотоника, 2021, том 15, № 5, С. 396–409. doi: 10.22184/1993-7296.
- [8] Rudakov, G.A., Sigarev, A.A., Fedirko, V.A., Fetisov, E.A.: Characterization of non-stoichiometric silicon nitride PECVD/ALD films for micro-detectors of IR imager array. // Proceedings of 14th International Baltic Conference on Atomic Layer Deposition (BALD-2016), Book of Abstracts, S.-Petersburg, p. 58, 2–4 October 2016.

[9] E.M. Smith et al, Enhanced performance of VOx-based bolometer using patterned gold black absorber // Proceedings of SPIE Vol. 9451, pp 94511I-1–94511I-7, 2015, doi: 10.1117/12.2177401.

[10] S. Ogawa, M. Kimata. Wavelength- or Polarization-Selective Thermal Infrared Detectors for Multi-Color or Polarimetric Imaging Using Plasmonics and Metamaterials // Materials 2017, 10, 493. doi:10.3390/ma10050493.

Design of High-Speed Thermocouple Sensors based on SOI Structures

R.Z. Khafizov

GraphImpress Co Ltd, Moscow, imagelab@mail.ru

Abstract — The potential capabilities of modern silicon technology allow using uncooled thermal sensors for the registration of IR radiation. Among them, we can highlight thermal MEMS sensors, the functioning of which is based on the use of the thermoelectric effect [1,2]. The efficiency of thermal sensors is evaluated using Figure of Merit (FOM) [3], which is the product of the noise–equivalent temperature difference (NETD) and its thermal relaxation time constant τ_r . NETD characterizes the sensitivity of the device, and τ_r is the reaction time to a change in thermal relief in the focal plane of the photodetector and the degree of blurring of the image of moving objects. The smaller the FOM, the better the sensor. However, the thermal mechanism of IR radiation conversion does not allow both NETD and τ_r to be effectively reduced at the same time. Therefore, when designing focal plane arrays (FPA) with thermal sensors, it is necessary to take into account their intended purpose. High sensitivity is necessary to solve the problems of highly sensitive detection of low-contrast targets at a longer range, while low values of τ_r are essential for applications where recording of rapidly changing events is required. Therefore, today a number of works are devoted to solving the problems of reducing τ_r to increase the performance of FPAs with thermal detectors [4].

The values of τ_r required for specific applications are provided by the choice of structural, thermophysical and photovoltaic parameters of sensor structures and are implemented in the process of testing the technology of their manufacture [5-6]. In this paper, on the basis of thermophysical analysis, the main design parameters of MEMS thermocouple sensors with a SOI structure are determined, providing the possibility of implementing a thermal relaxation time constant up to 1.5-2 ms in order to increase the frame frequency of IR FPA based on them to 150-200 Hz.

The SOI structure, as the basis for the thermopile sensor, makes it possible to use a Si-device layer as a sacrificial layer. Insulating vertical deep trench isolation and buried SiO₂ layer (BOX) of the SOI structure, having a high selectivity of etching with respect to silicon, makes it possible to effectively form a cavity under the membrane and consoles. In this case, the membrane and consoles can be formed from silicon dioxide, which has a low thermal conductivity.

Theoretical evaluation and analytical modeling of thermophysical parameters of thermocouple sensors were carried out, taking into account the requirements for sensor

sizes, their sensitivity and the thermal relaxation time constant. The main ratios of the structural elements of the sensitive cells are determined, taking into account the characteristics of the technological layers included in the membrane structure. The obtained results are used as initial data for the topological design of sensor elements and matrix arrays based on them. The topology of crystals with thermocouple sensors was designed taking into account the capabilities of technological equipment (design rules 0.8 microns).

Keywords — micro-electro-mechanical system (MEMS), thermoelectric effect, IR thermopile sensor, figure of merit (FOM), noise–equivalent temperature difference (NETD), SOI structure, thermal relaxation time constant.

REFERENCES

- [1] Khafizov R.Z. Infrared focal plane arrays (FPA) with thermopile thermal radiation MEMS sensors // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2014. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2014. Part 2. P. 193-196.
- [2] V.A. Fedirko, E.A. Fetisov, R.Z. Khafizov, G.A. Rudakov, A.A. Sigarev. Thermopile IR Sensor Arrays // Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development - 2016”, 14–15 December 2016, Moscow, Russia, pp. 39-48. doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7_5.
- [3] Dennis L. Waldron and Dieter J. Lohrmann, Per-Pixel Time Constant Measurement of Bolometer Cameras, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, April 2020. doi: 10.1109/TIM.2020.2985138
- [4] S. Tinnes, N. Boudou, A. Durand, Ulis Bolometer Improvements for Fast Imaging Applications, OECD Conference Center, Paris, France / 6 – 8 February, 2018.
- [5] R.Z. Khafizov, V.V. Startsev, V.Yu. Moskvichev. Bolometric Focal Plane Arrays with High Operating Speed // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, vol. 57, No. 5, 2021, pp. 511–520. doi: 10.3103/S8756699021050071.
- [6] R.Z. Khafizov, V.V. Startsev, V.Yu. Moskvichev. Fast Bolometric Focal Plane Arrays // Photonics vol. 15 No. 5 2021, pp. 396–409. doi: 10.22184/1993-7296.
- [7] Rudakov, G.A., Sigarev, A.A., Fedirko, V.A., Fetisov, E.A.: Characterization of non-stoichiometric silicon nitride PECVD/ALD films for micro-detectors of IR imager array. // Proceedings of 14th International Baltic Conference on Atomic Layer Deposition (BALD-2016), Book of Abstracts, S.-Petersburg, p. 58, 2–4 October 2016.
- [8] E. M. Smith et al, Enhanced performance of VOx-based bolometer using patterned gold black absorber // Proceedings of SPIE Vol. 9451, pp 94511I-1–94511I-7, 2015, doi: 10.1117/12.2177401.