

УДК 53.082.52+621.391.822
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-122-135>
EDN OABDBH



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Шумовые свойства предварительного усилителя для инфракрасного фотоприемника на основе HgCdTe

Д.В. Казанцев^{1, 2, @},
Е.А. Казанцева³

¹ ФИАН – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

² НИУ ВШЭ – Высшая школа экономики, Москва, 101000 Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: kaza@itep.ru

Резюме

Цели. Фоторезисторы на основе твердого раствора кадмий-ртуть-теллур (КРТ) применяются в инфракрасной (ИК) технике более 60 лет и в зависимости от композиции $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ имеют диапазон чувствительности в области длин волн от 1 до 15 мкм. Сопротивление светочувствительных КРТ-элементов составляет (в зависимости от площади) десятки Ом, и термодинамически ожидаемый шум Найквиста составляет менее $1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ для такого резистора. Современные полупроводниковые технологии обеспечивают высокое качество как фотоприемных устройств, так и входных каскадов микросхем для усиления сигнала с них. Целью работы является исследование шумовых свойств разработанного электронного блока, предназначенного для совместной работы с КРТ-фотоприемником, охлаждаемым жидким азотом.

Методы. Для измерения и накопления шумовых спектров сигнала в диапазоне частот 0–1 МГц использована микропроцессорная плата аналогового ввода-вывода P25M производства Innovative, Inc. (США). Плата, на которой имеются четыре 16-битовых аналого-цифровых преобразователя с частотой до 25 МГц, управляемая ими программируемая логическая интегральная схема Spartan-3, процессор TMS320C6713 и оперативная память, передает собранные цифровые данные в материнскую плату через общий для них слот PCI-X. Спектры принятых данных вычислялись с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье с последующим усреднением квадрата амплитуды для всех спектральных составляющих.

Результаты. Измерены спектры плотности шума первого каскада (ADA4898-2), второго каскада (AD8034) и источников тока смещения (AD8397 и LT3009). Обнаружено, что спектральная плотность шумов входа операционного усилителя ADA4898-2 сравнима с найквистовым (термодинамически ожидаемым) шумом резистора 20–100 Ом, соответствующего сопротивлению светочувствительного элемента. Это означает, что выбранный операционный усилитель идеально подходит для решения обсуждаемой технической задачи. Обнаружено также, что спектр шумов микросхем стабилизаторов напряжения и тока LT3009, ADR510 содержит заметную дрейфовую составляющую со спектральной плотностью вида $1/f^\alpha$ (f – частота, $\alpha \approx 1$).

Выводы. Показано, что спектральная плотность шумов электронных компонентов, приведенная ко входу устройства, в несколько раз ниже плотности шумов использованного фотоприемника.

Ключевые слова: ИК-фотоприемник, КРТ-приемник, малошумящая аппаратура, входные каскады, аналоговая электроника

• Поступила: 19.02.2024 • Доработана: 09.09.2024 • Принята к опубликованию: 28.11.2024

Для цитирования: Казанцев Д.В., Казанцева Е.А. Шумовые свойства предварительного усилителя для инфракрасного фотоприемника на основе HgCdTe. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):122–135. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-122-135>, <https://elibrary.ru/OABDBH>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Noise properties of preamplifier to be used with LN₂-cooled HgCdTe photodetector

Dmitry V. Kazantsev^{1, 2, @},
Elena A. Kazantseva³

¹ P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

² HSE – Higher School of Economy, Moscow, 101000 Russia

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: kaza@itep.ru

Abstract

Objectives. Photoresistors based on a solid solution of mercury–cadmium–tellurium (MCT) have been used in infrared (IR) technology for over 60 years. They can have a sensitivity range in the wavelength region from 1 μm to 15 μm, depending on Hg_{1-x}Cd_xTe composition. The resistance of photosensitive MCT elements is (depending on their area) tens of Ohms, and for such a resistor the thermodynamically expected Nyquist noise is less than 1 nV/√Hz. Modern semiconductor technologies ensure a high level of quality of both photodetectors and input stages of integrated circuits for amplifying the signal from them. The aim of this work is to study the noise properties of the electronic unit developed for joint operation with a liquid nitrogen cooled MCT-photodetector.

Methods. An analog input-output digital signal processor card P25M (Innovative, Inc., USA) was used to measure and accumulate the noise spectra of the signal in the frequency range 0–1 MHz. The card has four 16-bit ADCs of sampling rate up to 25MSpS, a Spartan-3 field-programmable gate array controlling them, a TMS320C6713 processor, and RAM, in order to transmit the collected digital data to the motherboard through a common PCI-X slot. The spectra of the received data were calculated using the fast Fourier transform algorithm with subsequent averaging of the square of the amplitude for all spectral components.

Results. The noise properties of comparatively modern integrated circuits currently used for this task were considered. The noise density spectra of the first stage (ADA4898-2), the second stage (AD8034), and bias current sources (AD8397 and LT3009) were measured. It was found that the spectral density of the input noise of the operational amplifier ADA4898-2 is comparable to the Nyquist (thermodynamically expected) noise of a 20–100-Ohm resistor corresponding to the resistance of the photosensitive element. This means that the selected operational amplifier is ideal for resolving the technical problem discussed herein. Meanwhile, it was also established that the noise spectrum of the LT3009, ADR510 voltage and current stabilizer integrated circuits contains a noticeable drift component with a spectral density of “pink noise” 1/f^α (f – frequency, α ≈ 1).

Conclusions. It was shown that the spectral noise density of the electronic components, reduced to the input of the device, is several times lower than the noise density of the photodetector used.

Keywords: IR-photodetector, MCT-photodetector, low-noise electronics, input stages, analog electronics

• Submitted: 19.02.2024 • Revised: 09.09.2024 • Accepted: 28.11.2024

For citation: Kazantsev D.V., Kazantseva E.A. Noise properties of preamplifier to be used with LN₂-cooled HgCdTe photodetector. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):122–135. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-122-135>, <https://elibrary.ru/OABDBH>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является исследование шумовых свойств разработанного и изготовленного электронного блока, предназначенного для совместной работы с охлаждаемым жидким азотом инфракрасным (ИК) фотодетектором на основе твердого раствора кадмий-ртуть-теллур (КРТ), и шумовых свойств такого фотоприемного устройства в целом.

Для приема оптических сигналов в среднем ИК-диапазоне широко применяются фотоприемники на основе соединения Hg_{1-x}Cd_xTe [1–5]. Ширина запрещенной зоны в этом полупроводнике зависит от доли кадмия [6]. Как было заявлено в первой работе [7] по поводу материала, ширина составляла 95 мВ (13 мкм), а в итоге оказалось, что может составлять и меньше, в зависимости от соотношения доли кадмия и теллура в кристалле. Оптические измерения края полосы поглощения [8, 9] и магнитные измерения проводимости [10, 11] позволили установить, что по мере роста доли кадмия x в твердом растворе Hg_{1-x}Cd_xTe кривая зависимости ширины запрещенной зоны пересекает нуль, поскольку валентная зона и зона проводимости меняются местами на энергетической диаграмме.

Промышленность прилагает усилия к разработке ИК-фотоприемников, основанных на новых принципах. Достигнуты успехи в формировании гетероструктур широкозонных полупроводников, в которых небольшая энергия рабочего оптического перехода, соответствующая величине принимаемого кванта света, определяется разницей в положении зон соседних слоев [12, 13]. Сообщалось об успехе использования для приема длинноволновых (малоэнергетичных) квантов света графеновых [14] и сверхпроводящих [15] структур. Тем не менее, фоторезистивные детекторы ИК-излучения, особенно для применения в одноканальных фотоприемниках, по-прежнему остаются востребованными с учетом их простоты, технологичности и проверенной десятилетиями функциональности.

Хотя теоретически обнаружительная способность D^* идеального фотодиода должна быть вдвое выше, чем чувствительность идеального фоторезистора [16], фотоприемники с фоторезистивным детектированием падающего на них ИК-света распространены гораздо шире. Заселение энергетических уровней в полупроводнике подчиняется распределению Ферми:

$$N(E) = N_0(E) \frac{1}{\frac{E - E_F}{kT} + 1}, \quad (1)$$

где E обозначает энергию электронного уровня; $N(E)$ – число фактически заселенных уровней с такой энергией; $N_0(E)$ – число уровней с энергией E , которые в принципе пригодны в качестве волновых функций в полупроводниковом кристалле и E_F – положение уровня Ферми в распределении. Масштаб размытия ступеньки заселенности соответствует температурному потенциалу Φ_T :

$$\Phi_T = \frac{kT}{e^-}. \quad (2)$$

Здесь T – температура в кельвинах, k – постоянная Больцмана и e^- – заряд электрона. Этот температурный потенциал при комнатной температуре (20°C) равен 26 мВ. Это означает, что число термодинамически возбуждаемых электронов и дырок при комнатной температуре составит приблизительно $e^{-\frac{50 \text{ мВ}}{26 \text{ мВ}}} = 2.71^{-2} = 0.13$ от общего числа состояний (примерно 10^{23} шт/см³), и вклад оптически возбуждаемых электронно-дырочных пар окажется пренебрежимо мал. Из этого следует, что узкозонные полупроводниковые фотоприемники обязательно требуются охлаждать. Удовлетворительные результаты приносит температура жидкого азота $T = 77$ К: показатель экспоненты возрастает в $300 \text{ К} / 77 \text{ К} = 3.89$ раз, а сама экспонента – в 1795 раз.

При использовании Hg_{1-x}Cd_xTe в режиме фотопроводимости на полупроводниковый кристалл с торцов подают ток (рис. 1). Полупроводниковый материал нанесен на непроводящую подложку. Активная фоточувствительная область расположена между напыленными на поверхность полупроводникового слоя проводящими (например, золотыми) контактами, и ее размер обычно составляет 50–1000 мкм. Предметом измерения служит падение напряжения на таком фоторезисторе. Естественно ожидать, что вариации тока смещения ΔI_{bias} , будучи умножены на сопротивление фоторезистора R_{det} (см. рис. 2) превратятся на выходе схемы в вариации напряжения $\Delta U_{\text{det}} = \Delta I_{\text{bias}} R_{\text{det}}$.

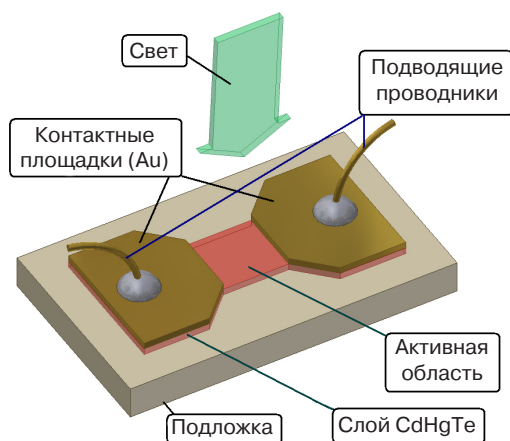


Рис. 1. Вид фотодетектора на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, размещенного на подложке¹

Схема, в которой на фоторезистор подают некоторое напряжение (рис. 2а), а предметом измерения является возникающий ток фотопроводимости, практически не используется. Во многих случаях полупроводниковая светочувствительная полоска размещена в азотном криостате на холодном пальце, и один из концов этой полоски заземлен, так что эта схема с точки зрения инженера неприменима. Схема включения (рис. 2б), в которой на КРТ-фоторезистор подают стабилизированный ток, а предметом измерения является возникающее на концах светочувствительной полоски напряжение, вполне осуществима с инженерной точки зрения и обеспечивает высокую линейность отклика. Однако подача хорошо стабилизированного тока с точки зрения инженера достаточно сложна и требует некоторого количества дополнительных радиокомпонентов. Наиболее используемой является схема, изображенная на рис. 2в, когда источником тока смещения для фоторезистора служит достаточно большой резистор, подключенный другим концом к источнику стабильного напряжения. На средней точке делителя напряжения, образованного фоторезистором R_{det} и резистором R_{bias} , формируется напряжение, которое зависит от освещенности фоторезистора.

Упомянутые приемы получения электрического сигнала – отклика на оптическое излучение – существуют уже более 60 лет. Ряд работ посвящен исследованию шумов самого фотоприемника, в частности отмечалось, что компонента вида $1/f^\alpha$ (f – частота, $\alpha \approx 1$) заметна в спектре шумов [17].

¹ Рисунок частично взят из брошюры «Mercury Cadmium Telluride Detectors». Teledyne Judson Technologies. http://www.judsontechnologies.com/mercadm_pc.html. Дата обращения 31.01.2022. [The idea for the composition of a drawing is taken from the booklet “Mercury Cadmium Telluride Detectors.” Teledyne Judson Technologies. http://www.judsontechnologies.com/mercadm_pc.html. Accessed January 31, 2022.]

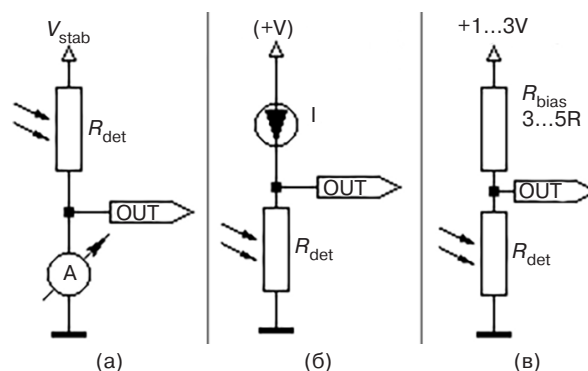


Рис. 2. Токоизмерительная схема включения фоторезистора (а), схема подачи смещения от генератора тока (б), традиционная схема включения² фоторезистора на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (в)

По поводу шумов со спектральной плотностью вида $1/f^\alpha$ следует сделать отступление. Как радиофизический феномен этот шум был, по-видимому, впервые обнаружен Джонсоном [18] при изучении спектра шумов лампового триода. Шоттки дал ему название «flicker-noise» (буквальный перевод с англ. – «мерцающий шум») и радиофизическое объяснение [19], состоявшее в том, что эмиссионная способность разных участков раскаленного катода постоянно подвергается хаотическим изменениям, которые затем остаются существовать надолго. Между тем, на протяжении XX века обнаружилось, что шумовым спектром вида $1/f^\alpha$ обладает огромное множество процессов: координата частицы при броуновском движении [20], параметры сердечных сокращений, сигнал радиопередачи музыки или новостей [21], годовой сток Нила, уровень моря... По этому поводу написано множество обзоров, например, [22, 23], и учебников, например, [24]. До сих пор обращаются к этой теме и радиофизики [25]. Во всех случаях зависимость спектральной плотности $\langle U_N^2 \rangle$ шумов от частоты f имеет вид $\langle U_N^2 \rangle \sim 1/f^\alpha$, где показатель степени $\alpha \sim 0.5 \dots 1.5$ примерно равен 1.

Между тем, качество фоточувствительных полупроводников, а также технические возможности используемых электронных компонентов, все эти годы росли. Уровень шумов (зависит от ширины запрещенной зоны в использованном КРТ-кристалле) уже близок к фундаментальному пределу, задаваемому в статистической физике формулой Найквиста:

$$\langle U_N^2 \rangle = 4kTR_{\text{det}}\Delta f \quad (\text{в полосе частот } \Delta f), \quad (3)$$

² PB212. J15D Series. Operating Instructions. Teledyne Judson Technologies. <https://www.teledynejudson.com/prods/Documents/PB212.pdf>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

основанной на значении омического сопротивления R_{det} фоторезистора. Подставив значения постоянной Больцмана $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, сопротивления $R_{\text{det}} = 50$ Ом и температуры $T = 77$ К, получим спектральную плотность шума 0.46 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Уровень шумов современных операционных усилителей (ОУ) имеет тот же порядок величины, что и у 50-омного резистора. Например, 0.9 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ у микросхемы ADA4898-2³.

Постоянная времени фотоприемников J15Dxx производства Teledyne Judson Technologies (США) составляет, в зависимости от площади и размера светочувствительного элемента, от 0.1 до 0.5 мкс. Естественно надеяться получить от предварительного усилителя полосу частот усиления 5–10 МГц, чтобы полностью использовать частотные возможности фоторезистора. Это означает, что в перечне ОУ следует искать модели с частотой единичного усиления ($G = 1$) $f_{G=1}$ больше 50 МГц. Такие модели у современных производителей есть. Например, самая малошумящая из таблицы, предлагаемой Analog Devices⁴ для выбора разработчикам, модель ОУ ADA4898-2 имеет значение частоты среза $f_{G=1} = 65$ МГц.

МЕТОДЫ

Схема включения фотоприемника и усилительной электроники

В качестве фотодетектора использовался KPT-фотоприемник J15D12-M204-100u (Teledyne Judson Technologies), установленный в заливаемом жидким азотом сосуде Дьюара M204. В основном этот фотоприемник предназначен для работы с CO₂-лазером и используется для детектирования слабой оптической волны, рассеянной зондирующей иглой в сканирующем микроскопе ASNOM [26–28], изготовленном NT-MDT-SI (Зеленоград, Россия). Электрический сигнал с фотоприемника подается на вход электронной схемы (рис. 3), в основном описанной в [29]. Первый каскад выполнен на малошумящем ОУ ADA4898-2. Резисторы обратной связи задают каскаду коэффициент усиления 40. Второй каскад выполнен на плате в двух вариантах: на ОУ DA3A с коэффициентом усиления 50 (приблизительно равные величины позволяют добиться максимальной ширины плоской амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) двух последовательных каскадов, с учетом $f_{G=1} = 65$ МГц) и на ОУ DA3B

с коэффициентом усиления 5, который иногда используется при большой величине оптического сигнала. Ток смещения, необходимый для работы фоторезистора (см. рис. 2в), подается через резистор R_{bias} с выхода регулируемого источника напряжения DA1.

На плате предусмотрен также другой источник стабилизированного тока, предназначенный для измерения температуры холодного пальца в криостате, на котором размещен фоторезистор. На холодном пальце в сосуде Дьюара рядом с фоторезистором установлен полупроводниковый диод, и падение напряжения на нем определяется формулой Шокли [30]:

$$I_D(U_D) = I_0 \left(\exp \left(\frac{U_D e^-}{kT} \right) - 1 \right) \approx I_0 \exp \left(\frac{U_D e^-}{kT} \right),$$

т.е. при заданном токе I_D через диод напряжение U_D на нем пропорционально температуре. Измерение (по падению напряжения на резисторе R39) и стабилизацию тока смещения осуществляет ОУ DA4B, а «идеал» напряжения для него формирует «стабилитрон» DA5 ADR510 (микросхема⁵).

С целью измерения при настройке электроники тока смещения, подаваемого в фоторезистор, на плате предусмотрены гнезда, в которые можно установить резистор R_{meas} вместо отключенного на это время кабеля от фотоприемника.

Измерительная микропроцессорная плата аналогового ввода

Для записи спектров шума фотоприемника и предварительного усилителя сигнала использовалась микропроцессорная плата аналогового ввода-вывода P25M производства Innovative, Inc. (США) [31]. На этой плате установлены 4 канала аналого-цифрового преобразователя (АЦП), 4 канала цифроаналогового преобразователя (16 бит, частота оцифровки и тех, и других – до 25 МГц), управляющая ими программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) Spartan-3, процессор TMS320C6713 и оперативная память. Логическая структура ПЛИС обеспечивает весьма точное задание частоты оцифровки входного напряжения (цифровой делитель частоты и схема фазовой автоподстройки частоты для подстройки тактового генератора АЦП). Перед началом измерения в логическую структуру ПЛИС программно загружалась также длина пакета измерений, выполняемых после старта процесса без дополнительного вмешательства

³ <https://www.analog.com/ADA4898-2/datasheet>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

⁴ <https://www.analog.com>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

⁵ <https://www.analog.com/ADR510/datasheet>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

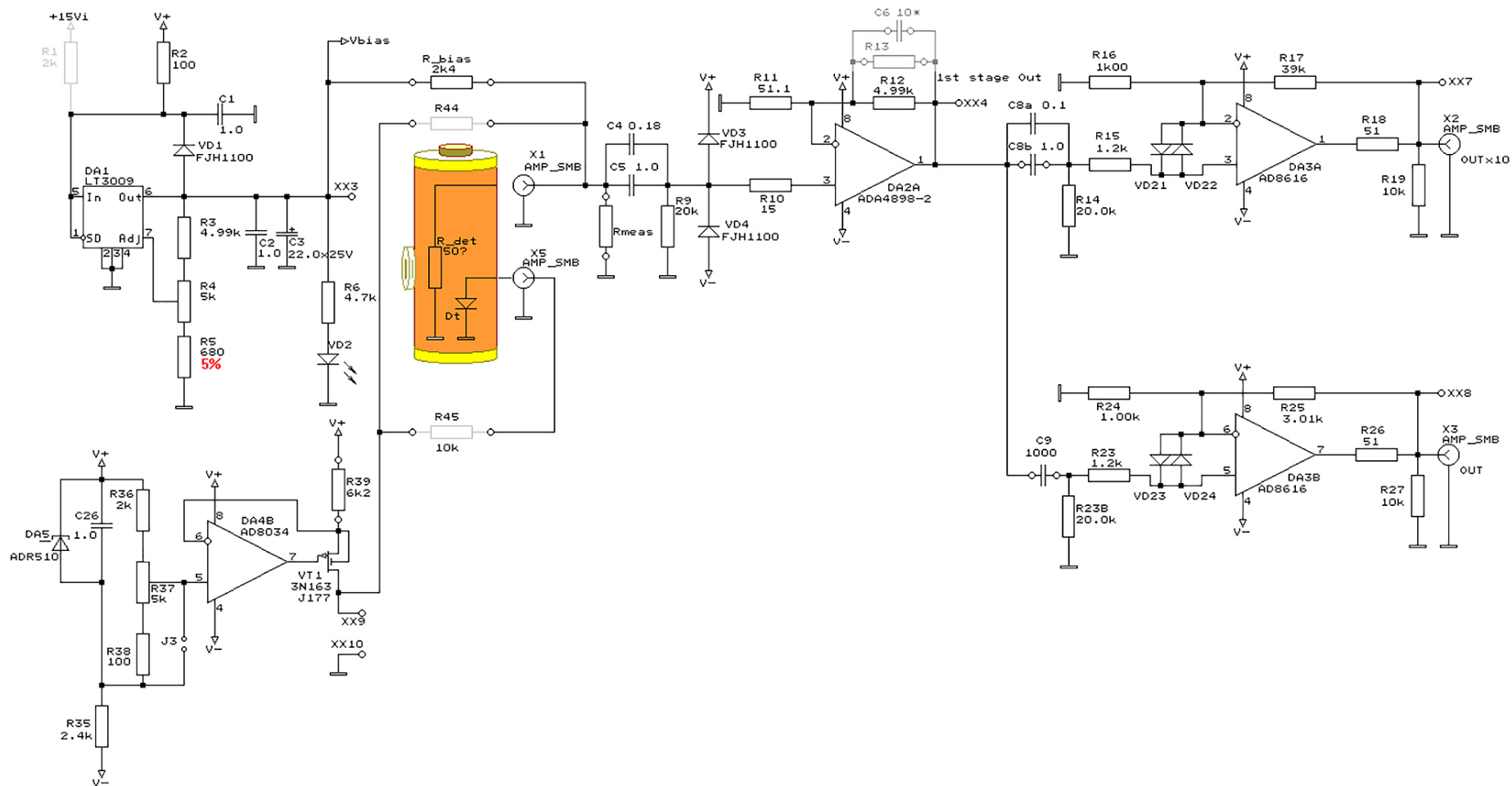


Рис. 3. Принципиальная схема платы предварительных усилителей, предназначенной для совместной работы с HgCdTe фотодетектором, работающим в среднем ИК-диапазоне. Обозначения частично приведены в соответствии с ГОСТ 2.710-81⁶

⁶ ГОСТ 2.710-81. Межгосударственный стандарт. *Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах.* М.: Стандартинформ; 2008. [GOST 2.710-81. Interstate standard. *Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams.* Moscow: Standardinform; 2008 (in Russ.).]

со стороны процессора TMS320C6713 платы P25M. Полученные таким образом несколько тысяч значений измерений АЦП в виде массива 16-битовых целых чисел попадают вначале в адресное пространство платы, а затем пересылаются через общий слот PCI-X в материнскую плату компьютера, работающего под управлением *Windows*. Такая организация работы АЦП позволяет быть уверенным, что все события единичного измерения входного напряжения платой расположены совершенно равномерно во времени. В этом отношении вычисленный по таким данным спектр входного сигнала можно считать достоверным.

Обработка полученных данных спектра

Полученный с измерительной платы пакет отсчетов АЦП обрабатывался в компьютере на языке C++. Основой вычисления спектра являлся алгоритм быстрого преобразования Фурье [32, 33]. Прямое преобразование Фурье вычислялось по массиву данных, полученных из платы ввода-вывода. Данные преобразовывались из исходного формата `short (int16)` в формат с плавающей точкой `double`, причем эти действительные значения соответствуют входному напряжению в вольтах. Частота оцифровки и длительность пакета измеренных значений известны программе и заносились в поля данных класса, однако, на «оси времени» вычисления велись в безразмерном виде. Это позволило оставаться уверенными в корректности преобразований, убедившись для различных длин массива данных в неизменности амплитуд спектральных компонент, неизменном выполнении теоремы Парсеваля (сумма квадратов гармоник «на шкале частот» должна равняться сумме квадратов отсчетов «на шкале времени») и независимости величины спектральных компонент от частоты оцифровки. Разумеется, для выполнения перечисленных требований приходилось нормировать полученные значения гармоник на корень квадратный из рабочей длины массива данных.

По окончании вычислений спектральных компонент было организовано накопление квадрата их комплексной величины с усреднением полученного значения. Средняя величина амплитуды любой гармоники (кроме, возможно, нулевой) при усреднении хаотического сигнала стремится к нулю, а вот средний квадрат, что естественно, стремится к среднему уровню шумов в этой области спектра. Неизменность предела, к которому стремятся средние квадраты амплитуд спектральных компонент по мере увеличения числа попыток усреднения спектров, а также независимость результата от числа точек разбиения и от частоты срабатывания АЦП

убеждают в том, что метод накопления и усреднения данных выбран правильно.

По желанию пользователя накопленные данные, в процессе измерения отображаемые на виртуальном дисплее, могут быть экспортированы на диск в виде ASCII-текста. В этой таблице первый столбец содержит номер спектральной точки, второй столбец содержит частоту спектральной компоненты и третий столбец – ее среднеквадратичную амплитуду. При экспорте данные нормируются на корень квадратный из ширины спектра, которая берется из известной частоты оцифровки данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектр входных шумов АЦП

Перед началом измерений параметров обсуждаемого усилителя необходимо было убедиться в том, что плата аналогового ввода-вывода P25M, как измерительный прибор, сама вносит мало шума и искажений в измеряемый сигнал. Шумовые спектры, полученные с пустого (неподключенного) входа АЦП, показаны на рис. 4. Как видно из рисунка, спектральная плотность вносимого измерительным прибором шума не зависит от частоты. Уровень спектральной плотности входного шума измерительной платы (около $1.4 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$) неплохо соответствует предсказаниям выражения (3) при ее входном сопротивлении 50 Ом. Следует отметить, что предварительный усилитель на входе АЦП допускает перед началом измерений программную установку усиления (варианты {GND, $\pm 200 \text{ мВ}$, $\pm 1 \text{ В}$, $\pm 2.5 \text{ В}$ } для диапазонов допустимого сигнала), и уровень шума на широком размахе входного сигнала (диапазон значений измеряемого входного сигнала $\pm 2.5 \text{ В}$), т.е. при умеренном усилении до входа АЦП, заметно выше (рис. 4), чем шум в режиме большого усиления на входе измерительной платы (диапазон входного сигнала $\pm 200 \text{ мВ}$).

Зависимости спектральной плотности шума от частоты, записанные для выходного сигнала исследуемой платы, показаны на рис. 5. Кривые спектральной плотности были пересчитаны ко входу схемы путем деления на коэффициент усиления $G_{\text{OUT} \times 1} = 200$ для данных, полученных с выхода канала малого усиления $\text{OUT} \times 1$, и на коэффициент усиления $G_{\text{OUT} \times 10} = 2000$ для данных, полученных с выхода канала большого усиления $\text{OUT} \times 10$. Масштаб величины спектральной плотности шумов составляет для этого случая тоже несколько $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Можно утверждать, что роль второго каскада при высоком коэффициенте усиления $G_{\text{OUT} \times 10} = 2000$ заметно снижается. Кривая спектральной плотности шумов, вносимых измерительной платой (рис. 4), помещена рядом с кривыми шумов исследуемой платы

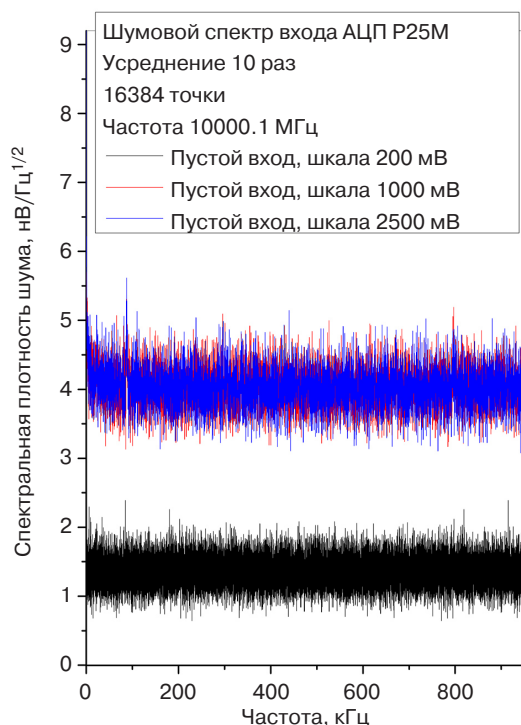


Рис. 4. Спектры шума, записанные с неподключенного входа ADC0 измерительного АЦП, полученные при различном размахе его входной шкалы

предусилителя на рис. 5. Для визуальной совместности кривых на одном рисунке, эти данные (рис. 4) поделены на коэффициент усиления $G_{OUT \times 1} = 200$, соответствующий меньшему из двух возможных значений, используемых для пересчета измеренной на выходе OUT плотности шума ко входу исследуемого усилителя. Из рис. 5 видно, что с учетом

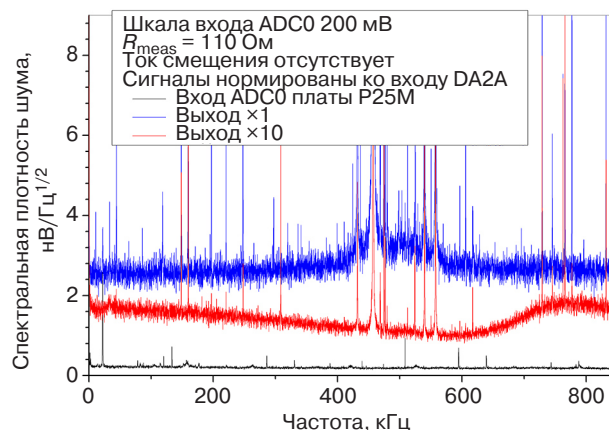


Рис. 5. Кривые спектральной плотности шума, записанные с выхода $\times 1$ платы (общий коэффициент усиления 200), выхода $\times 10$ (общий коэффициент усиления 2000), неподключенного входа ADC0 измерительного АЦП

большого усиления исследуемой схемы роль шумов входных каскадов измерительной платы P25M пренебрежимо мала, даже если измеренное среднеквадратичное значение шумового сигнала на неподключенном входе АЦП делить на относительно небольшое число $G_{OUT \times 1} = 200$.

Зависимость шума входа от величины входного резистора

С целью проверки, являются ли записанные спектры входного шума усилителя физической величиной или артефактом программного алгоритма, была измерена зависимость спектральной плотности шума, приведенной ко входу, от величины сопротивления R_{meas} , соединяющего вход с «землей» платы (рис. 6).

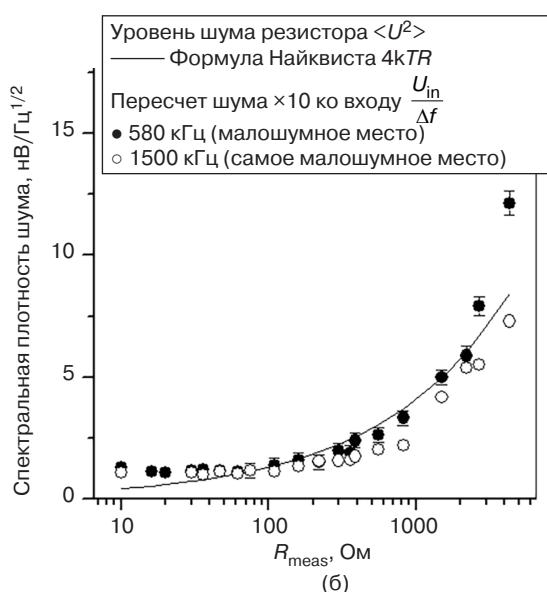
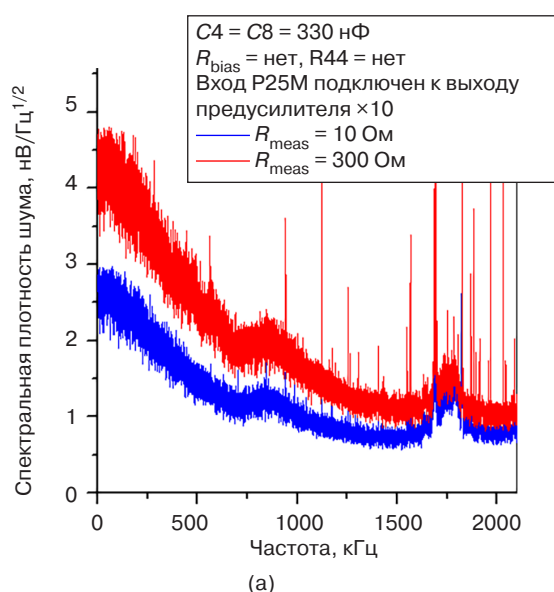


Рис. 6. (а) Спектральная плотность шума, измеренная при частоте дискретизации 4 МГц при соединении входа с «землей» через резистор $R_{meas} = 10$ Ом; (б) зависимость плотности шума в «тихих» участках от сопротивления резистора R_{meas} . Для сравнения приведена кривая, построенная с помощью формулы Найквиста

Величина спектральной плотности собираемого с помощью АЦП сигнала была поделена на коэффициент усиления двух каскадов $G_{OUT \times 10} = 40 \times 50 = 2000$ для канала усиления с выходом на разъем OUT $\times 10$. В целом, масштаб уровня шума $(0.8...5) \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ соответствует величине, указанной в справочном листке⁷ на микросхему ADA4898-2 ($0.9 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$). Как можно видеть на графике, спектральная плотность шума далека от воображаемого идеала: в спектре лабораторного эфира присутствует много острых линий, соответствующих, по-видимому, работе многочисленных ключевых блоков питания. Кроме того, спектральная плотность шума и в среднем не является плоской кривой: на низких частотах уровень шума несколько выше, что, по всей вероятности, обусловлено хаотическими сдвигами среднего уровня смещения входных радиокомпонентов (flicker noise) с его характерным спектром $1/f^\alpha$.

Тем не менее, измеренный уровень шума неплохо соответствует зависимости плотности шума от сопротивления источника сигнала (резистора R_{meas}), ожидаемой из формулы Найквиста (3), что показано на рис. 6б. Регистрируемая плотность шума на частотах выше 700–1000 кГц оказывается для резисторов с сопротивлением больше 1 кОм даже чуть ниже, чем предсказывает статистическая физика. Однако эта плотность шума получена путем деления выходного сигнала на коэффициент усиления двух последовательных каскадов (на 2000), а с частоты 800–1000 кГц как раз начинается спад АЧХ-усилителя. Задаваемый резисторами обратной связи коэффициент усиления каждого каскада составляет около 50, и такая величина для использованных нами ОУ с частотой единичного усиления $f_T \approx 50\text{--}60 \text{ МГц}$ уже является задачей на пределе возможностей в области частот порядка 1 МГц и выше. Это означает, что изображенные на рис. 6 графики для плотности шума ниже найквистова уровня являются в области частот 1500 кГц лишь иллюзией.

Уровень входных шумов при работе от резистора смещения

Спектр шумового сигнала, измеренного при подаче тока смещения через резистор $R_{\text{bias}} = 820 \text{ Ом}$ от источника регулируемого опорного напряжения DA1 LT3009, показан на рис. 7. В качестве нагрузки для тока смещения использован вместо фотоприемника резистор $R_{\text{meas}} = 110 \text{ Ом}$ (обозначения компонентов даны на рис. 3). Напряжение смещения $V_{\text{bias}} = 2.8 \text{ В}$. При таком включении на частотах до 200 кГц преобладающую роль в спектре

начинает играть шум вида $1/f^\alpha$, вносимый генератором LT3009 напряжения смещения V_{bias} .

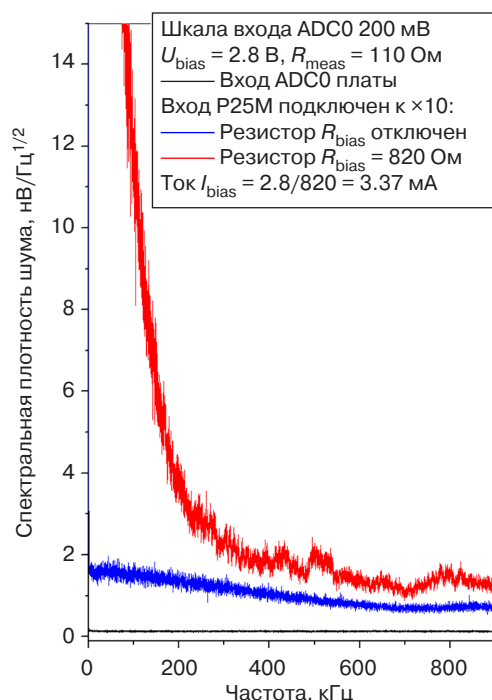


Рис. 7. Спектры шума, записанные при подаче тока смещения через резистор $R_{\text{bias}} = 820 \text{ Ом}$ от стабилизированного напряжения $V_{\text{bias}} = 2.8 \text{ В}$

Уровень шумов со спектром вида $1/f^\alpha$ в стабилизированном микросхемой LT3009 напряжении, заметно высокий по сравнению с белым найквистовым шумом входного резистора R_{meas} и первого каскада отборной (по шумам) модели ОУ ADA4898-2, не должен удивлять. В справочном листке⁸ на микросхему регулируемого стабилизатора LT3009 утверждается, что типичное среднеквадратичное напряжение выходных шумов для этой модели составляет 150 мкВ при величине фильтрующей емкости $C3 = 1.0 \text{ мкФ}$. Интегрирование наблюдаемого в эксперименте уровня шума в диапазоне 0–200 кГц как раз и дает приблизительно это значение. Емкость фильтрующего конденсатора незначительно помогает стабилизации выходного напряжения каскада на интересующих нас низких частотах.

Уровень входных шумов при работе от источника стабилизированного тока

Присутствие значительной компоненты вида $1/f^\alpha$ в спектре сигнала при использовании резистора смещения, работающего от стабилизатора напряжения LT3009, побудило подать ток смещения

⁷ <https://www.analog.com/ADA4898-2/datasheet>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

⁸ <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3009fd.pdf>. Дата обращения 31.01.2022. / Accessed January 31, 2022.

от генератора стабильного тока (рис. 8). При разработке печатной платы была предусмотрена такая возможность, а именно, гнезда для установки резистора R44. В таком включении стабилизацию тока, протекающего через КРТ-фоторезистор, осуществляет микросхема DA4B (рис. 3), сравнивающая падение напряжения на токоизмерительном резисторе R39 с напряжением на «стабилитроне» DA5 (микросхема ADR510). Величина R39 для этого измерения была уменьшена до 620 Ом.

Представленные на рис. 8 спектры шума входного сигнала, собираемого при такой конфигурации электронной схемы, показывают, что такой способ подачи тока смещения на светочувствительный элемент фотоприемника не приносит выигрыша в среднеквадратичном уровне шумов аппаратуры, пересчитанном ко входу устройства.

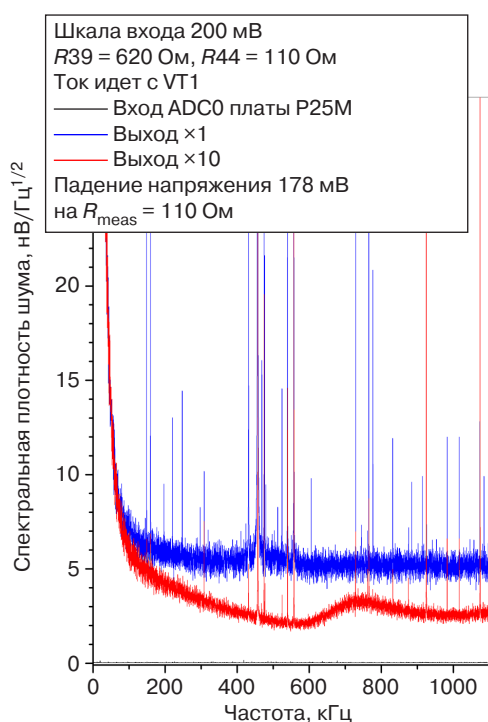


Рис. 8. Спектры шума, записанные при подаче тока смещения через резистор R44

Шумы в данном случае определяются уровнями шумов самой микросхемы AD8034, генератором опорного напряжения ADR510 и также (в последнюю очередь) утечкой через затвор VT1. Ожидания, что установка отборного малошумящего ОУ в качестве DA4B должна обеспечить низкий уровень шума, не оправдались. Основной вклад в появление шумов дает микросхема «стабилитрона» ADR510: RMS-среднее⁹ ее шумов составляет 4 мкВ в диапазоне 0–10 Гц на фоне напряжения стабилизации 1 В.

⁹ Root mean square – среднеквадратичное значение.

Спектр шумов предварительного усилителя, подключенного к фотоприемнику

Спектры шумов, записанные при подключении фотоприемника ко входу исследуемого предварительного усилителя, приведены на рис. 9. Следует отметить, что в нашем случае пришлось скорее понижать оптическую чувствительность фотоприемника, чем бороться за ее повышение. В рабочем режиме, когда луч CO_2 лазера мощностью 17 мВт на линии $\nu = 934.93 \text{ см}^{-1}$ подается на вход схемы Майкельсона, используемой для детектирования сигнала, рассеянного зондирующей иглой ASNOМ, приходится уменьшать электрический сигнал, чтобы выходной каскад предварительного усилителя и используемая шкала АЦП не вошли в режим отсечки по напряжению. Спектр собираемого электрического сигнала над поверхностью кристаллического образца SiC при нормальной к поверхности амплитуде колебаний иглы 70 нм представлен на рис. 9. При получении этих данных ток смещения КРТ-датчика установлен равным 1.5 мА, вместо 2.5 мА, как рекомендовано изготовителем для достижения максимального отношения сигнал/шум (в нашем случае светочувствительный элемент имел площадь $100 \times 100 \text{ мкм}^2$). Для этого смещение подается на КРТ-датчик от выхода регулируемого источника напряжения DA1 LT3009 $V_{\text{bias}} = 2.8 \text{ В}$ через резистор $R_{\text{bias}} = 1.8 \text{ кОм}$. При измерениях спектра шумов реального фототока (рис. 9) для обеспечения рабочей температуры фотоприемника был налит жидкий азот. Электрический сигнал снимался с выхода $\times 1$ предварительного усилителя, а не с выхода $\times 10$, что (см. рис. 4) соответствует несколько худшим шумовым свойствам фотоприемника с предварительным усилителем, чем при использовании выхода $\times 10$ электроники в пересчете ко входу схемы.

Как видно из рис. 9 (средняя кривая), уровень собственных шумов фотоприемника, пересчитанный ко входу предварительного усилителя, превышает в 3–5 раз измеренные уровни шумов входа исследуемой схемы (для сравнения нижняя кривая на рис. 9 содержит спектр входных шумов предварительного усилителя в случае, когда фотодетектор заменен резистором 11 Ом). Это означает, что с практической точки зрения дальнейшие попытки снизить уровень шумов лишены смысла. Спектр оптического сигнала, собираемого в рабочем режиме ASNOМ (амплитуда нормальных колебаний острия иглы 70 нм, частота 55 кГц, образец SiC), представлен на верхнем графике рис. 9. Видно, что область повышенных шумов вида $1/f^\alpha$, вносимых использованными при разработке схемы источниками напряжения, кончается уже к частоте второй (110 кГц)

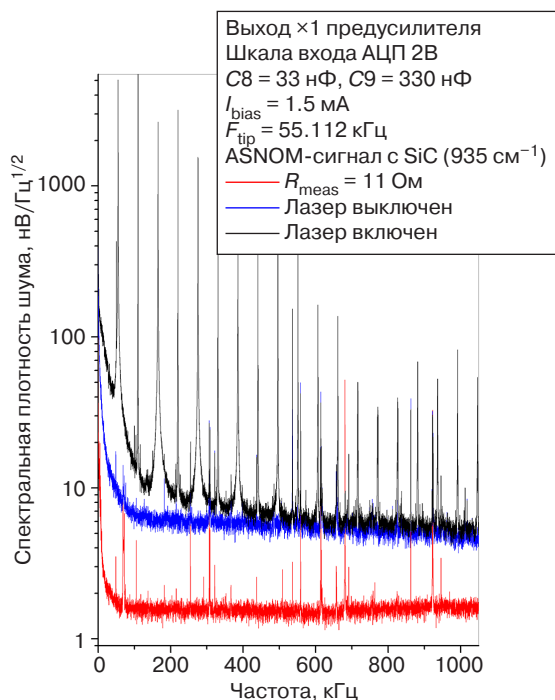


Рис. 9. Спектры шума, записанные при подключении азотно-охлаждаемого КРТ-фотоприемника к исследуемому усилителю.

F_{tip} – частота колебаний кантилевера

и тем более высоких гармоник частоты модуляции «игла-поверхность» (165 кГц, 220 кГц...), представляющих для экспериментатора интерес в методике ASNOМ. Одновременно с этим можно утверждать, что шумы со спектром вида $1/f^\alpha$, вносимые самим КРТ-фотоприемником, заметно превышают в области частот до 100 кГц уровень шумов использованных в эксперименте микросхем.

ВЫВОДЫ

Использование малошумящих ОУ ADA4898-2 в первом каскаде схемы предварительного усилителя,

предназначенного для работы с КРТ-фотоприемником с площадью активного элемента 100×100 мкм² позволило получить в диапазоне частот 0–1 МГц спектральную плотность шума ниже $1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ в пересчете на его вход. Обнаружено, однако, что микросхема LT3009, использованная в качестве источника регулируемого опорного напряжения, при формировании тока смещения через резистор по традиционной для КРТ-фотоприемников схеме вносит шум вида $1/f^\alpha$, заметный на частотах до 100 кГц. Источник тока на полевом транзисторе с использованием «стабилитрона» ADR510 в качестве «идеала» напряжения и не очень малошумящего AD8034 в качестве регулятора тока тоже вносит шумы вида $1/f^\alpha$, заметные до 150–200 кГц. Между тем, измеренный спектр шума самого фотоприемника в рабочем режиме (при температуре жидкого азота) имеет типичную амплитуду порядка $5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Рабочие частоты, на которых и в дальнейших экспериментах предполагается проводить измерения, являются гармониками частоты механических колебаний кантилевера ASNOМ. Для используемой модели кантилевера FMG01/Pt эта частота составляет 60–80 кГц, и тогда частоты высших гармоник начинаются со 120 кГц. Это означает, с практической точки зрения, что замеченные дрейфовые шумы источников тока смещения не играют определяющей роли. Тем не менее, при разработке электронных схем для совместной работы с КРТ-фотоприемниками следует серьезно относиться к шумовым свойствам источников стабилизированного напряжения.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Norton P. HgCdTe infrared detectors. *Opto-Electron. Rev.* 2002;10(3):159–174.
2. Kopytko M., Rogalski A. New insights into the ultimate performance of HgCdTe photodiodes. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022;339:113511. <https://www.doi.org/10.1016/j.sna.2022.113511>
3. Józwickowska A., Józwickowski K., Rogalski A. Performance of mercury cadmium telluride photoconductive detectors. *Infrared Phys.* 1991;31(6):543–554. [https://www.doi.org/10.1016/0020-0891\(91\)90141-2](https://www.doi.org/10.1016/0020-0891(91)90141-2)
4. Rogalski A. Commentary on the Record-Breaking Performance of Low-Dimensional Solid Photodetectors. *ACS Photonics*. 2023;10(3):647–653. <https://www.doi.org/10.1021/acsphotonics.2c01672>
5. Кульчицкий Н.А., Наумов А.Б., Старцев В.В. Охлаждаемые фотоприемные устройства ИК-диапазона на кадмий-ртуть-теллуре: состояние и перспективы развития. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2020;6(197):114–121. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.197.6.114.121>
6. Hansen G.L., Schmit J.L., Casselman T.N. Energy gap versus alloy composition and temperature in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. *J. App. Phys.* 1982;53(10):7099–7101. <https://www.doi.org/10.1063/1.330018>

7. Lawson W., Nielsen S., Putley E., Young A. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe–CdTe. *J. Phys. Chem. Solids*. 1959;9(3–4):325–329. [https://www.doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90110-6](https://www.doi.org/10.1016/0022-3697(59)90110-6)
8. Schmit J.L., Stelzer E.L. Temperature and Alloy Compositional Dependences of the Energy Gap of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. *J. Appl. Phys.* 1969;40(12):4865–4869. <https://www.doi.org/10.1063/1.1657304>
9. Scott M.W. Energy Gap in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ by Optical Absorption. *J. Appl. Phys.* 1969;40(10):4077–4081. <https://www.doi.org/10.1063/1.1657147>
10. Elliott C., Melngailis J., Harman T., Kafalas J., Kernan W. Pressure Dependence of the Carrier Concentrations in *p*-Type Alloys of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ at 4.2 and 77°K. *Phys. Rev. B*. 1972;5(8):2985. <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.5.2985>
11. McCombe B.D., Wagner R.J., Prinz G.A. Far-Infrared Observation of Electric-Dipole-Excited Electron-Spin Resonance in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. *Phys. Rev. Lett.* 1970;25(2):87–90. <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevLett.25.87>
12. Xin W., Zhong W., Shi Y., Shi Y., Jing J., Xu T., Guo J., Liu W., Li Y., Liang Z., Xin X., Cheng J., Hu W., Xu H., Liu Y. Low-Dimensional-Materials-Based Photodetectors for Next-Generation Polarized Detection and Imaging. *Adv. Mater.* 2024;36(7):2306772. <https://doi.org/10.1002/adma.202306772>
13. Xue X., Chen M., Luo Y., Qin T., Tang X., Hao Q. High-operating-temperature mid-infrared photodetectors via quantum dot gradient homojunction. *Light: Sci. Appl.* 2023;12(1):2. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-01014-0>
14. Agarwal H., Nowakowski K., Forrer A., Principi A., Bertini R., Batlle-Porro S., Reserbat-Plantey A., Prasad P., Vistoli L., Watanabe K., Taniguchi T., Bachtold A., Scalari G., Krishna Kumar R., Koppens F.H.L. Ultra-broadband photoconductivity in twisted graphene heterostructures with large responsivity. *Nat. Photon.* 2023;17(12):1047–1053. <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01291-0>
15. Lau J.A., Verma V.B., Schwarzer D., Wodtke A.M. Superconducting single-photon detectors in the mid-infrared for physical chemistry and spectroscopy. *Chem. Soc. Rev.* 2023;52:921–941. <https://doi.org/10.1039/d1cs00434d>
16. Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook. *Rep. Prog. Phys.* 2005;68(10):2267. <http://doi.org/10.1088/0034-4885/68/10/R01>
17. Kimchi J., Frederick J.R., Wong T.T.S. Low-frequency noise in photoconductive HgCdTe detectors. *Proc. SPIE*. 1996;2812. 12 p. <https://doi.org/10.1117/12.254098>
18. Johnson J.B. The Schottky Effect in Low Frequency Circuits. *Phys. Rev.* 1925;26(1):71–85. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.26.71>
19. Schottky W. Small-Shot Effect and Flicker Effect. *Phys. Rev.* 1926;28(1):74–103. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.28.74>
20. Dutta P., Horn P.M. Low-frequency fluctuations in solids: 1/f noise. *Rev. Mod. Phys.* 1981;53(3):497–516. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.53.497>
21. Voss R.F., Clarke J. 1/f noise in music and speech. *Nature*. 1975;258(5533):317. <https://doi.org/10.1038/258317a0>
22. Press W.H. Flicker noises in astronomy and elsewhere. *Comments Astrophys.* 1978;7(4):103–119.
23. Milotti E. 1/f noise: a pedagogical review. 2002; *ArXivV_0204033v1*. <https://arxiv.org/pdf/physics/0204033>
24. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть I. Случайные процессы. М.: Наука; 1976. 496 с.
25. Morikawa M., Nakamichi A. A simple model for pink noise from amplitude modulations. *Sci. Rep.* 2023;13(1):8364. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34816-2>
26. Zenhausern F., O'Boyle M.P., Wickramasinghe H.K. Apertureless near-field optical microscope. *Appl. Phys. Lett.* 1994;65(13):1623–1625. <http://doi.org/10.1063/1.112931>
27. Zenhausern F., Martin Y., Wickramasinghe H.K. Scanning Interferometric Apertureless Microscopy: Optical Imaging at 10 Angstrom Resolution. *Science*. 1995;269(5227):1083–1085. <https://doi.org/10.1126/science.269.5227.1083>
28. Keilmann F., Hillenbrand R. Near-Field Microscopy by Elastic Light Scattering from a Tip. *Philos. Trans.: Math., Phys. Eng. Sci.* 2004;362(1817):787–805. <https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1347>
29. Казанцев Д.В., Казанцева Е.А. Предусилитель для CdHgTe-фотодетектора. *Приборы и техника эксперимента*. 2020;1:144–150. <https://doi.org/10.31857/S0032816220010218>
30. Shockley W. The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *Bell System Tech. J.* 1949;28(3):435–489. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x>
31. Казанцев Д.В., Казанцева Е.А. Цифровое детектирование оптического сигнала в микроскопе ближнего оптического поля. *Приборы и техника эксперимента*. 2022;2:79–98. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=pribyory&y=2022&v=0&n=2&a=Pribyory2202014Kazantsev>
32. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comp.* 1965;19(90):297–301. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1>
33. Stephens D.R., Diggins C., Turkanis J., Cogswell J. *C++ Cookbook*. O'Reilly Media, Inc.; 2005. 592 p. ISBN 978-059-600-761-4

REFERENCES

1. Norton P. HgCdTe infrared detectors. *Opto-Electron. Rev.* 2002;10(3):159–174.
2. Kopytko M., Rogalski A. New insights into the ultimate performance of HgCdTe photodiodes. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022;339:113511. <https://www.doi.org/10.1016/j.sna.2022.113511>
3. Józwickowska A., Józwickowski K., Rogalski A. Performance of mercury cadmium telluride photoconductive detectors. *Infrared Phys.* 1991;31(6):543–554. [https://www.doi.org/10.1016/0020-0891\(91\)90141-2](https://www.doi.org/10.1016/0020-0891(91)90141-2)

4. Rogalski A. Commentary on the Record-Breaking Performance of Low-Dimensional Solid Photodetectors. *ACS Photonics*. 2023;10(3):647–653. <https://www.doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c01672>
5. Kulchitsky N.A., Naumov A.B., Startsev V.V. Cooled IR photodetectors based on cadmium-mercury-tellurium: current status and development prospects. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2020;6(197):114–121 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.197.6.114.121>
6. Hansen G.L., Schmit J.L., Casselman T.N. Energy gap versus alloy composition and temperature in Hg_{1-x}Cd_xTe. *J. Appl. Phys.* 1982;53(10):7099–7101. <https://www.doi.org/10.1063/1.330018>
7. Lawson W., Nielsen S., Putley E., Young A. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe–CdTe. *J. Phys. Chem. Solids*. 1959;9(3–4):325–329. [https://www.doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90110-6](https://www.doi.org/10.1016/0022-3697(59)90110-6)
8. Schmit J.L., Stelzer E.L. Temperature and Alloy Compositional Dependences of the Energy Gap of Hg_{1-x}Cd_xTe. *J. Appl. Phys.* 1969;40(12):4865–4869. <https://www.doi.org/10.1063/1.1657304>
9. Scott M.W. Energy Gap in Hg_{1-x}Cd_xTe by Optical Absorption. *J. Appl. Phys.* 1969;40(10):4077–4081. <https://www.doi.org/10.1063/1.1657147>
10. Elliott C., Melngailis J., Harman T., Kafalas J., Kernan W. Pressure Dependence of the Carrier Concentrations in p-Type Alloys of Hg_{1-x}Cd_xTe at 4.2 and 77°K. *Phys. Rev. B*. 1972;5(8):2985. <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevB.5.2985>
11. McCombe B.D., Wagner R.J., Prinz G.A. Far-Infrared Observation of Electric-Dipole-Excited Electron-Spin Resonance in Hg_{1-x}Cd_xTe. *Phys. Rev. Lett.* 1970;25(2):87–90. <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevLett.25.87>
12. Xin W., Zhong W., Shi Y., Shi Y., Jing J., Xu T., Guo J., Liu W., Li Y., Liang Z., Xin X., Cheng J., Hu W., Xu H., Liu Y. Low-Dimensional-Materials-Based Photodetectors for Next-Generation Polarized Detection and Imaging. *Adv. Mater.* 2024;36(7):2306772. <https://doi.org/10.1002/adma.202306772>
13. Xue X., Chen M., Luo Y., Qin T., Tang X., Hao Q. High-operating-temperature mid-infrared photodetectors via quantum dot gradient homojunction. *Light: Sci. Appl.* 2023;12(1):2. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-01014-0>
14. Agarwal H., Nowakowski K., Forrer A., Principi A., Bertini R., Batlle-Porro S., Reserbat-Plantey A., Prasad P., Vistoli L., Watanabe K., Taniguchi T., Bachtold A., Scalari G., Krishna Kumar R., Koppens F.H.L. Ultra-broadband photoconductivity in twisted graphene heterostructures with large responsivity. *Nat. Photon.* 2023;17(12):1047–1053. <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01291-0>
15. Lau J.A., Verma V.B., Schwarzer D., Wodtke A.M. Superconducting single-photon detectors in the mid-infrared for physical chemistry and spectroscopy. *Chem. Soc. Rev.* 2023;52:921–941. <https://doi.org/10.1039/d1cs00434d>
16. Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook. *Rep. Prog. Phys.* 2005;68(10):2267. <http://doi.org/10.1088/0034-4885/68/10/R01>
17. Kimchi J., Frederick J.R., Wong T.T.S. Low-frequency noise in photoconductive HgCdTe detectors. *Proc. SPIE*. 1996;2812. 12 p. <https://doi.org/10.1117/12.254098>
18. Johnson J.B. The Schottky Effect in Low Frequency Circuits. *Phys. Rev.* 1925;26(1):71–85. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.26.71>
19. Schottky W. Small-Shot Effect and Flicker Effect. *Phys. Rev.* 1926;28(1):74–103. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.28.74>
20. Dutta P., Horn P.M. Low-frequency fluctuations in solids: 1/f noise. *Rev. Mod. Phys.* 1981;53(3):497–516. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.53.497>
21. Voss R.F., Clarke J. 1/f noise in music and speech. *Nature*. 1975;258(5533):317. <https://doi.org/10.1038/258317a0>
22. Press W.H. Flicker noises in astronomy and elsewhere. *Comments Astrophys.* 1978;7(4):103–119.
23. Milotti E. 1/f noise: a pedagogical review. 2002; *ArXiv_0204033v1*. <https://arxiv.org/pdf/physics/0204033>
24. Rytov S.M. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Chast' I. Sluchainnye protsessy (Introduction to Statistical Radiophysics. Part I. Random Processes)*. Moscow: Nauka; 1976. 496 p. (in Russ.).
25. Morikawa M., Nakamichi A. A simple model for pink noise from amplitude modulations. *Sci. Rep.* 2023;13(1):8364. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34816-2>
26. Zenhausern F., O'Boyle M.P., Wickramasinghe H.K. Apertureless near-field optical microscope. *Appl. Phys. Lett.* 1994;65(13):1623–1625. <http://doi.org/10.1063/1.112931>
27. Zenhausern F., Martin Y., Wickramasinghe H.K. Scanning Interferometric Apertureless Microscopy: Optical Imaging at 10 Angstrom Resolution. *Science*. 1995;269(5227):1083–1085. <https://doi.org/10.1126/science.269.5227.1083>
28. Keilmann F., Hillenbrand R. Near-Field Microscopy by Elastic Light Scattering from a Tip. *Philos. Trans.: Math., Phys. Eng. Sci.* 2004;362(1817):787–805. <https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1347>
29. Kazantsev D.V., Kazantseva E.A. A Preamplifier for a CdHgTe Photodetector. *Instrum. Exp. Tech.* 2020;63(1):133–138. <https://doi.org/10.1134/S0020441220010194>
[Original Russian Text: Kazantsev D.V., Kazantseva E.A. A Preamplifier for a CdHgTe Photodetector. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2020;1:144–150 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032816220010218>]
30. Shockley W. The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *Bell System Tech. J.* 1949;28(3): 435–489. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x>
31. Kazantsev D.V., Kazantseva E.A. Digital Detection of Optical Signals in a Near-Optical-Field Microscope. *Instrum. Exp. Tech.* 2022;65(2):273–291. <https://doi.org/10.1134/S0020441222020130>
[Original Russian Text: Kazantsev D.V., Kazantseva E.A. Digital Detection of Optical Signals in a Near-Optical-Field Microscope. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2022;2:79–98 (in Russ.). Available from URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=pribory&y=2022&v=0&n=2&a=Pribory2202014Kazantsev>]

32. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comp.* 1965;19(90): 297–301. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1>
33. Stephens D.R., Diggins C., Turkanis J., Cogswell J. *C++ Cookbook*. O'Reilly Media, Inc.; 2005. 592 p. ISBN 978-059-600-761-4

Об авторах

Казанцев Дмитрий Всеволодович, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУН «Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук» (ФИАН) (119991, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 53); профессор, факультет физики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (101000, Россия, Москва, Старая Басманная ул., д. 21/5). E-mail: kaza@itep.ru. Scopus Author ID 6603178750, <https://orcid.org/0000-0002-0547-3785>

Казанцева Елена Адольфовна, старший преподаватель, кафедра высшей математики, Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kanele19@gmail.com. Scopus Author ID 57219932826, <https://orcid.org/0009-0004-2019-3310>

About the authors

Dmitry V. Kazantsev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Research, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (53, Leninskii pr., Moscow, 119991 Russia); Professor, Faculty of Physics, HSE University (21/5, Staraya Basmannaya ul., Moscow, 101000 Russia). E-mail: kaza@itep.ru. Scopus Author ID 6603178750, <https://orcid.org/0000-0002-0547-3785>

Elena A. Kazantseva, Senior Lecturer, Higher Mathematics Department, Institute of Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kanele19@gmail.com. Scopus Author ID 57219932826, <https://orcid.org/0009-0004-2019-3310>