

Высокотемпературная тепловизионная система на кремниевом фотоприемнике

А.А. Манцветов^{1,*}, Д.С. Барвиненко^{1,†}, П.О. Лазовская^{2,‡}, В.В. Давыдов^{2,§}, В.В. Наумова³

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ», факультет радиотехники и телекоммуникаций, кафедра телевидения и видеотехники

Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

²Санкт-Петербургский Политехнический университет имени Петра Великого, институт электроники и телекоммуникаций
Россия, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

³Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева
Россия, 190005, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19

(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 02.07.2024)

Обоснована необходимость поиска новых решений при наблюдении нагретых тел в диапазоне температур 400°C ... 1400°C . Установлены особенности работы и потенциальных характеристик измерительной тепловизионной системы для наблюдения высокотемпературных объектов, выполненной на основе кремниевого КМОП-сенсора. Для создания тепловизионной системы на кремниевом фотоприемнике Sony для наблюдения высокотемпературных объектов проведен расчет числа сигнальных электронов, образующихся в фотоприемнике при различных температурах. Кремниевые фотоприемники обычно используются для наблюдения в видимом диапазоне электромагнитного излучения, где объекты отражают световой поток. В работе предлагается использовать кремниевые фотоприемники в ближнем ИК-диапазоне, где объекты излучают. Разработана тепловизионная система на кремниевом фотоприемнике. Полученные с ее использованием новые результаты подтвердили возможность создания тепловизионной системы на кремниевом фотоприемнике.

PACS: 07.57.Kp

УДК: 535-1

Ключевые слова: инфракрасный диапазон, кремниевый фотоприемник, тепловизионная система, абсолютно черное тело.

ВВЕДЕНИЕ

В современных научных исследованиях и производственных процессах очень часто возникает необходимость в получении изображения о распределении градиента температур на поверхности нагретого объекта или расплава [1, 2]. С учетом того, что диапазон температур, при котором необходимо наблюдать явления нагрева на поверхностях сейчас составляет от 400°C ... 1400°C возникает различное число практических задач по приложению результатов данных исследований [3–5]. Например, термическая обработка металлов может влиять на их свойства, такие как коррозионная стойкость, магнетизм, твердость, пластичность, стойкость к истиранию и разрушению [6]. Отдельно необходимо рассмотреть процессы производства оптических элементов. Бесконтактное измерение температуры в процессе производства оптических элементов позволяет выявить трещины, утолщения, тонкие места или неровности [7–9].

В обслуживании оборудования, контроле состояния огнеупорной футеровки, печей отжига, термоформочного оборудования тепловизионные системы становятся незаменимым инструментом. Помимо этого, тепловизионная система может применяться для контроля

температуры котлов и турбин ТЭЦ, атомных реакторов, индукционных печей [10].

Все это показывает, что развитие и разработка новых систем наблюдения нагретых объектов или расплавов в диапазоне температур 400°C ... 1400°C является крайне актуальной, особенно в условиях импорта замещения.

Проблемой всех тепловизионных систем, которых требуется все больше и больше, является их высокая стоимость и необходимость охлаждения рабочих элементов. Это создает большие сложности при их массовой эксплуатации и доступности потребителям для полного контроля производственного цикла.

Поэтому целью нашей работы является создание тепловизионной системы на кремниевом фотоприемнике [11] для наблюдения нагретых тел и расплавов в диапазоне температур 400°C ... 1400°C . Этот тип фотоприемника не требует существенного охлаждения.

1. ВЫБОР ФОТОПРИЕМНИКА ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ

Для построения тепловизионной системы был выбран диапазон длин волн $900\text{...}1050\text{ нм}$. Данные цифры обусловлены следующими обстоятельствами. При увеличении температуры кристалла фотоприемника квантовая эффективность кремния в диапазоне $1050\text{...}1100\text{ нм}$ меняется в сторону увеличения, что может привести к ошибкам при измерении температуры нагретых тел [12, 13]. Ограничение в 900 нм связа-

* aamantcvetov@etu.ru

† 9281890@gmail.com

‡ kek0star@yandex.ru

§ davydov_vadim66@mail.ru

но с тем, что при высоких температурах наблюдаемых объектов количество фотонов и, соответственно, количество образовавшихся электронов станет чрезвычайно большим, что вызовет ограничение видеосигнала. В соответствии с ТЗ для построения тепловизионной системы КМОП сенсор должен иметь высокую чувствительность для наблюдения объектов с относительно невысокой температурой и в то же время должен обеспечивать возможность наблюдения высокотемпературных объектов, световой поток от которых может быть в сотни тысяч или же миллионы раз больше. Также КМОП сенсор должен иметь минимальные темновые токи, т. к. телевизионная камера может работать в условиях высокой температуры окружающей среды, а темновой ток фотоприемника экспоненциально зависит от температуры, увеличиваясь в два раза при повышении ее на $6^\circ \dots 8^\circ\text{C}$.

Таким параметрам соответствуют КМОП сенсоры фирмы Sony поколение Pregius S. Они имеют размер пикселя $9 \times 9 \text{ мкм}^2$ и аномально малые темновые токи. Для повышения чувствительности предполагается использовать биннинг, т. е. суммирование видеосигналов с двух соседних пикселей по вертикали и по горизонтали.

На основании вышесказанного для построения тепловизионной системы был выбран сенсор IMX432LLJ-C — твердотельный датчик изображения КМОП (CMOS) с диагональю 17.6 мм и квадратными пикселями для монохромных камер. Сенсор обладает глобальным затвором и разрешением 1.76 Мп. Ему свойственны высокая чувствительность и низкий темновой ток [14].

Параметры КМОП-сенсора:

- размер пикселя $9 \times 9 \text{ мкм}^2$;
- число пикселей $1604\text{H} \times 1100\text{V}$;
- число пикселей в режиме биннинга $802\text{H} \times 550\text{V}$;
- максимальная частота кадров 90 Гц;
- тип затвора — глобальный;
- тип засветки — фронтальный.

Спектральная характеристика сенсора представлена на рис. 1.

Необходимо отметить, что в дальнейшем планируется переход на отечественный фотоприемник. Так, требуемый размер пикселя со стороной 15...20 мкм позволяет реализовать КМОП-сенсор или матричный ПЗС в рамках технологических норм, освоенных в Российской Федерации. В АО «НПП «Элар» освоены матричные ПЗС с таким размером пикселя, использующие электронное усиление накопленного зарядового пакета, что позволяет свести эквивалентный выходной шум к значению в единицы электронов. Помимо этого, в АО «НПП «Элар» ведется разработка отечественных КМОП-сенсоров, характеристики которых с каждым годом улучшаются [15].

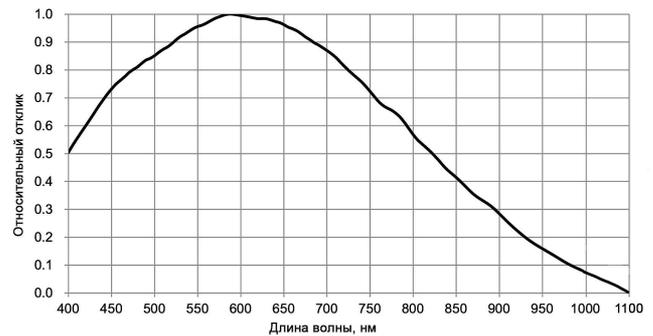


Рис. 1. Спектральная характеристика фотоприемника

Такие же работы ведутся в АО «Пульсар», г. Москва, в фирме Юник Ай-сиз, г. Зеленоград, в АО «НИИ телевидения», г. Санкт-Петербург. Так КМОП-сенсор 1205XB014 имеет размер пикселя $15 \times 15 \text{ мкм}^2$, режим электронного затвора, дающий возможность наблюдать нагретые тела с высокой температурой [16].

2. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЧИСЛА СИГНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПИКСЕЛЕ ФОТОПРИЕМНИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В соответствии с [17, 18] спектральная плотность потока излучения (мощность, излучаемая с поверхности единичной площади в единичном интервале частот в герцах) при заданной температуре T по закону Планка определяется выражением

$$R(\lambda, T) = \varepsilon \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \left[\frac{\text{В}}{\text{м}^3} \right], \quad (1)$$

где ε — коэффициент излучения, λ — длина волны электромагнитного излучения, [м], T — абсолютная температура [К], $h = 6.63 \times 10^{-34}$ [Вт·с²] — постоянная Планка, $c = 3 \times 10^8$ [м/с] — скорость света в вакууме, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ [(Вт·с)/К] — постоянная Больцмана. С учетом того, что энергия фотона равна

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2)$$

спектральная плотность числа фотонов потока излучения при заданной температуре T

$$N_p(T, \lambda) = \varepsilon \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \left[\frac{1}{\text{м}^2} \right], \quad (3)$$

Спектральная плотность числа фотонов, попадающих на светочувствительный пиксель за секунду на длине волны λ с учетом его площади и параметров объектива

$$N_{ppx}(T, \lambda) = N_{Pfd}(T, \lambda) \cdot A = N_p(T, \lambda) \frac{\tau \left(\frac{D}{f} \right)^2}{4} A, \quad (4)$$

где τ — коэффициент пропускания объектива, D/f — относительное отверстие объектива, A — площадь пикселя фотоприемника, N_{fd} — спектральная плотность числа фотонов, попавших на фотоприемник. Тогда спектральная плотность числа фотонов, попадающих на светочувствительный пиксел за кадр на длине волны λ равна

$$N_{pk}(T, \lambda) = N_{ppx}(T, \lambda) \cdot T_{\text{нак}}. \tag{5}$$

Максимальная квантовая эффективность выбранного сенсора равна 0.7. Квантовая эффективность QE зависит от длины волны в соответствии с рис. 1. Количество электронов, образованных световым потоком в диапазоне $[\lambda_1, \lambda_2]$ в пикселе за одну секунду, таким образом будет равно

$$N_e(T) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} N_{ppx}(T, \lambda) \cdot QE(\lambda) d\lambda. \tag{6}$$

С учетом длительности кадра T_{frame} число электронов, образовавшихся в пикселе, равно

$$N_{ek}(T) = N_e(T) \cdot T_{frame}, \tag{7}$$

$$N_{ek}(T, \lambda) = \frac{\tau \left(\frac{D}{f}\right)^2}{4} A \cdot T_{frame} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \cdot QE(\lambda) d\lambda. \tag{8}$$

Фотонный шум имеет распределение Пуассона. Исходя из этого, ОСШ определяется выражением

$$\Psi = \frac{N_{ek}}{\sqrt{N_{ek} + N_{rn}^2}}, \tag{9}$$

где N_{rn} — собственный шум считывателя, равный в режиме биннинга 10 электронам.

Расчитанные с помощью пакета программ MATLAB значения величин приведены в таблице, на рис. 2 и 3 для следующих исходных данных:

1. диапазон температур — 673...1673 К;
2. диапазон длин волн — 900...1050 нм;
3. коэффициент серости — ε : 0.25;
4. размер пикселя фотоприемника — $A = 18 \times 18 = 3.24 \times 10^{-10} \text{ м}^2$;
5. частота кадров 50 Гц, длительность кадра — $T_{\text{нак}} = 20 \text{ мс}$;
6. относительное отверстие объектива — D/f : 1:8;
7. коэффициент пропускания объектива — $\tau = 0.75$.

Таблица. Оценка числа сигнальных электронов

T, K	ОСШ	N_k
673	2.980951	28.701
873	67.09385	4564.7
1073	335.0165	112300
1273	1009.919	1020000
1473	2262.065	5117000
1673	4184.488	17510000
1873	6792.638	46140000
2073	10049.87	101000000

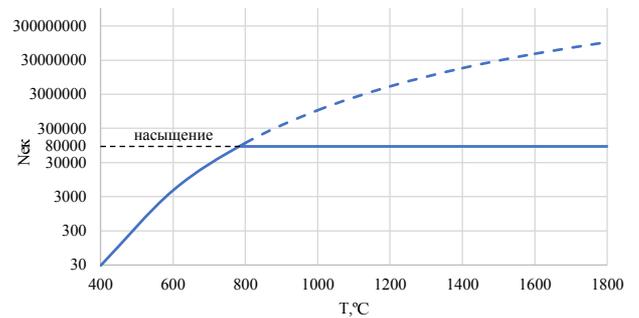


Рис. 2. Зависимость числа образованных электронов от температуры

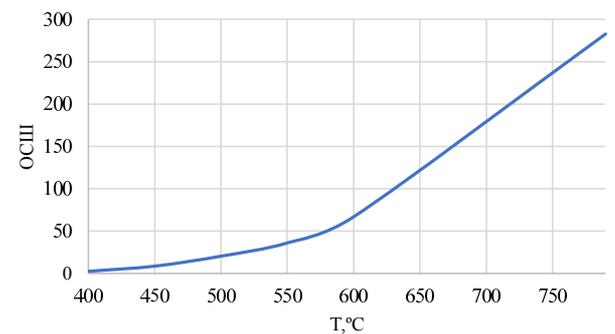


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум фотоприемника от температуры

Проведенный анализ показывает, что при использовании КМОП-сенсора с эквивалентным размером пикселя $18 \times 18 \text{ мкм}^2$ уверенное измерение температуры возможно при ее превышении значения в 430°C . Отношение сигнал шум при этом будет равно 26 дБ и средняя точность составит 5%. При меньших температурах необходимо либо увеличивать время накопления, либо улучшать относительное отверстие объектива. При температурах выше 790°C значение сигнала попадает в насыщение. Для измерения необходимо использовать режим электронного затвора, позволяю-

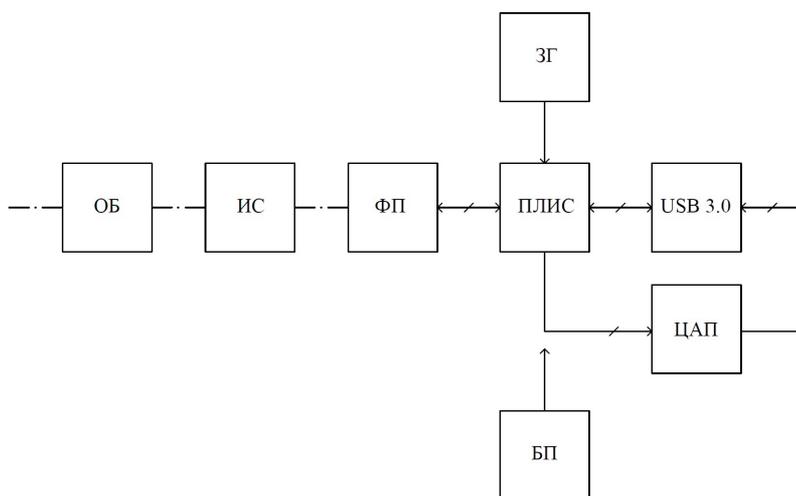


Рис. 4. Структурная схема ВТС: ЗГ — задающий генератор, ОБ — объектив, ИС — интерференционный светофильтр, ФП — фотоприемник, ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема, БП — блок питания, ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь, USB 3.0 — микросхема преобразователя интерфейса в USB 3.0

ший снижать чувствительность КМОП-сенсора путем уменьшения времени накопления. Зависимость значения сигнала от времени накопления является линейной, что позволит осуществлять измерения при температурах выше 790°C , учитывая во сколько раз изменилось время накопления. Отношение сигнал/шум при этом будет неизменным и составлять 50 дБ. Точность при этом будет составлять 0.34%. Таким образом, возможно построение тепловизионной системы на кремниевом КМОП-сенсоре для измерения температуры нагретых тел.

3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ

Структурная схема тепловизионной системы представлена на рис. 4.

Оптический сигнал, проходя через ОБ и ИС с полосой пропускания 900–1050 нм, попадает на ФП, где преобразуется в электрический сигнал. БП формирует напряжения для работы всей системы. Данные с ФП в цифровом виде (SLVS интерфейс) поступают на ПЛИС для последующей обработки и передачи на микросхему преобразователя интерфейса в USB 3.0 и ЦАП. Таким образом предполагается два выходных интерфейса: цифровой USB 3.0 и аналоговое видео [19].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 5 представлена схема экспериментального стенда. В качестве нагретого тела с коэффициентом

излучения ε использовалась электроплитка. Температура плитки дополнительно измерялась с помощью пирометра. Инфракрасное излучение, попадая через объектив и интерференционный светофильтр в тепловизионную камеру, обрабатывается программным обеспечением, позволяющим выводить изображение с тепловизионной камеры в реальном времени.

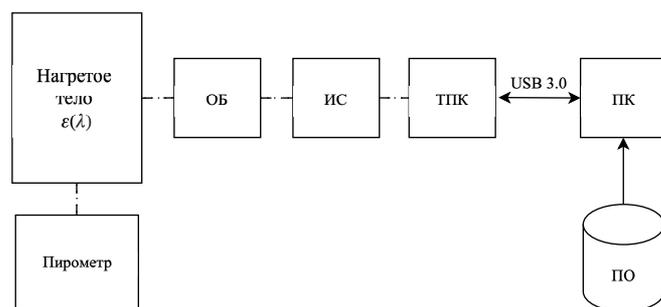


Рис. 5. Структурная схема экспериментального стенда

Полученное тепловизионное изображение представлено на рис. 6. С помощью камеры наблюдались температуры в диапазоне $430 \dots 1400^{\circ}\text{C}$

Измерения, полученные пирометром и тепловизионной камерой, совпадают с точностью $\pm 5^{\circ}$ (рис. 7). Погрешность измерения пирометром объясняется неравномерным нагревом плитки.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, подтверждают положение, что тепловизионной камерой на кремниевом фотоприемнике возможно измерение температуры нагретых тел в диапазоне $430^{\circ} \dots 1400^{\circ}\text{C}$ с высокой точностью.

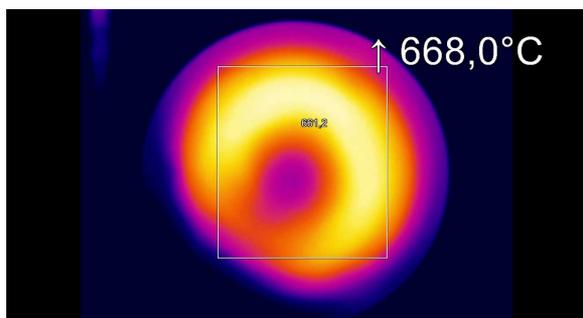


Рис. 6. Полученное тепловизионное изображение)



Рис. 7. Процесс измерения температуры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показали возможность уверенного измерения температуры в диапазоне $430^{\circ}\text{C} \dots 1400^{\circ}\text{C}$ тепловизионной системой на кремниевом фотоприемнике типа IMX432LLJ-C. При температуре ниже 430°C уверенное измерение температуры невозможно и для повышения чувствительности необходимо увеличивать время накопления, либо улучшать относительное отверстие. При температуре 790°C возможно насыщение на уровне 80 000 электронов. В этом случае выбранный КМОП-сенсор позволяет использовать режим электронного затвора для снижения чувствительности. Проведенный аналитический расчет

числа сигнальных электронов в пикселе в зависимости от температуры, коэффициента излучения и параметров оптической системы показывает, что при температуре 430°C отношение сигнал/шум составит 26 дБ, что эквивалентно точности 5%. При высокой температуре точность измерений составляет порядка 0.3%.

Стоит отметить, что выбранный кремниевый фотоприемник с размером пикселя $9 \times 9 \text{ мкм}^2$, малыми темновыми токами, широким диапазоном времени накопления и малыми шумами позволяет создать недорогую по сравнению с другими тепловизионную систему, не требующую охлаждения. Для повышения чувствительности предполагается биннинг 2×2 , что эквивалентно размеру пикселя $18 \times 18 \text{ мкм}^2$.

- [1] *Mozhayko A.A., Gerashchenkov D.A., Gerashchenkova E.Yu., Davydov V.V.* // St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics. N 15(3-2) 274 (2022).
- [2] *Kuznetsov Y., Kravchenko I., Gerashchenkov D. et al.* // Energies. N 15(3). 912. (2022).
- [3] *Геращенко Д.А., Геращенко Е.Ю., Можайко А.А. et al.* // Вопросы материаловедения. № 2(110). 28 (2022).
- [4] *Galarraga H., Warren R.J., Lados D.A. et al.* // Mater Sci Eng: A. N 685. 417 (2017).
- [5] *Mozhayko A.A., Manninen S.A., Davydov V.V. et al.* // Journal of Physics: Conference Series. **1745**(1), 012046. (2021).
- [6] Temperature measurement for steel Brochure / ep-power.com. <https://ep-power.com/wp-content/uploads/2021/02/Temperature-Measurement-for-Steel-Brochure.pdf> (дата обращения 28.05.2024)
- [7] Temperature measurement for glass Brochure / ep-power.com. <https://ep-power.com/wp-content/uploads/2021/02/Temperature-Measurement-for-Glass-Brochure.pdf> (дата обращения 30.05.2024).
- [8] *Smirnov K.I., Davydov V.V., Glinushkin A.P.* // Journal of Physics: Conference Series. **1695**, N 1, 012090. (2020).
- [9] *Dyumin V., Smirnov K., Davydov V., Myazin N.* // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics. EExPolytech 2019. **8906868**, 308 (2019).
- [10] *Neudeck P.* // NASA Glenn Research Center. 2023. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230009977/downloads/ICSCRM2023TutorialV1.pdf> (дата обращения 1.06.2024).
- [11] Understanding radiation thermometry. // NASA Armstrong Flight Research Center. 2015. URL:<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150021315/downloads/20150021315.pdf>
- [12] *Белоус Д.А.* // Изв. ВУЗов России. Радиоэлектроника. № 3. 60 (2017).
- [13] *Белоус Д. А.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения № 2. 41 (2017).
- [14] IMX432LLJ. Diagonal 17/6 mm (Type 1.1) CMOS solid-state Image Sensor with Square Pixel for Monochrome Cameras. Ver. 1.3 // SONY. Product Information. https://www.phaselvision.com/userfiles/product_files/imx432llj_lqj_flyer.pdf (дата обращения 29.05.2024).
- [15] *Вишневецкий Г.И., Четвергов М.В., Выдревич М.Г., Попов А.Г.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника

- телевидения. № 3. 3 (2018).
- [16] Умбиталиев А.А., Пятков В.В., Цыцулин А.К. и др. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. № 4. 4 (2016).
- [17] Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978.
- [18] Госсорге Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с фр. М.: Мир, 1988. 1
- [19] Манцветов А.А., Барвиненко Д.С. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения № 1. 88 (2024).

High-temperature thermal imaging system based on a silicon photodetector

A. Mantcvetov^{1,a}, D.S. Barvinenko¹, P.O. Lazovskaya^{2,b}, V.V. Davydov^{2,c}, V.V. Naumova³

¹Department of Television and Video Engineering, Faculty of Radio Engineering and Telecommunications, Saint Petersburg Electrotechnical University

St. Petersburg 197022, Russia

²Institute of Electronics and Telecommunications, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Saint Petersburg 194064, Russia

³D.I. Mendeleev Institute for Metrology. St. Petersburg, 19005, Russia

E-mail: ^aaamantcvetov@etu.ru, ^bkek0star@yandex.ru, ^cdavydov_vadim66@mail.ru

The necessity of searching for new solutions when observing heated bodies in the temperature range of 400°...1400°C is substantiated. The features of the operation and potential characteristics of a thermal imaging measuring system for observing high-temperature objects based on a silicon CMOS sensor have been established. To create a thermal imaging system on a Sony silicon photodetector for observing high-temperature objects, the number of signal electrons formed in the photodetector at different temperatures was calculated. Silicon photodetectors are usually used for observation in the visible range of electromagnetic radiation, where objects reflect the luminous flux. It is proposed to use silicon photodetectors in the near-infrared range, where objects emit. A thermal imaging system based on a silicon photodetector has been developed. The new results obtained using it confirmed the possibility of creating a thermal imaging system based on a silicon photodetector.

PACS: 07.57.Kp.

Keywords: infrared range, silicon photodetector, thermal imaging system, blackbody.

Received 09 June 2024.

Сведения об авторах

1. Манцветов Андрей Александрович — канд. тех. наук., профессор; e-mail: aamantcvetov@etu.ru.
2. Барвиненко Дмитрий Сергеевич — студент 2 года обучения магистратуры; e-mail: 9281890@gmail.com.
3. Лазовская Полина Олеговна — студентка 4 года обучения бакалавриата; e-mail: kek0star@yandex.ru.
4. Давыдов Вадим Владимирович — доктор физ-мат. наук, профессор; e-mail: davydov_vadim66@mail.ru.
5. Наумова Виктория Викторовна — инженер; email: vika_025898@mail.ru.