

УДК 535.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕР НА КМОП-МАТРИЦАХ

А.Н. Старченко^а, В.Г. Филиппов^а, Ю.А. Югай^а

^а АО «НИИ ОЭП», Сосновый Бор, 188540, Российская Федерация
Адрес для переписки: vlaffy@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 22.03.17, принята к печати 16.06.17
doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-628-634
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Старченко А.Н., Филиппов В.Г., Югай Ю.А. Исследование температурной зависимости чувствительности телевизионных камер на КМОП-матрицах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 628–634. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-628-634

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы характер и закономерности изменения чувствительности цифровых видеокамер на основе кремниевых КМОП-матриц в видимой и ближней инфракрасной областях спектра при изменении температуры окружающей среды. Актуальность исследования объясняется возрастающими потребностями применения подобных видеокамер для решения фотометрических задач в натуральных и цеховых условиях. **Метод.** С учетом области применения видеокамер температурные изменения фиксировались в спектральном диапазоне 400–1100 нм, а также с применением фильтров в трех спектральных интервалах, значимых для их практического применения. Эксперименты проводились с использованием климатической камеры MC-811R, обеспечивающей изменение и поддержание температуры в диапазоне от –40 °С до +50 °С с шагом 10 °С. Для исследований выбраны две камеры VAC-135-IP с матрицей фирмы OmniVision OV9121 и VAC-248-IP с матрицей фирмы OnSemiconductor VITA2000. Для идентичности измерений исследуемые приборы располагались в климатической камере одновременно и одновременно освещались галогенной лампой с цветовой температурой около 3000 К. **Основные результаты.** Показано, что зависимость выходного сигнала видеокамер от температуры в целом линейна. Температурные коэффициенты чувствительности возрастают при увеличении длины волны падающего излучения. Особый вид имеет зависимость сигнала камеры VAC-248-IP в ближнем инфракрасном участке спектра, она аппроксимируется полиномом второй степени. Проведенные эксперименты показали необходимость учета температурных изменений чувствительности камер на кремниевых матрицах в красной и ближней инфракрасной областях спектра. Негативным образом эффект проявляется в камерах с амплитудным разрешением 10–12 бит, применяемых для авиационной и космической спектросонольной съемки. Пренебрежение температурным изменением чувствительности в этом диапазоне может приводить к ошибкам до 20–40%. **Практическая значимость.** Полученные в работе значения коэффициентов температурной чувствительности позволяют расчетным образом корректировать полученные сигналы и получать более достоверную информацию о фотометрических свойствах сцен и объектов.

Ключевые слова

кремниевая матрица, цифровая камера, спектральная зависимость чувствительности, температурное изменение чувствительности

SENSITIVITY TEMPERATURE DEPENDENCE RESEARCH OF TV-CAMERAS BASED ON SILICON MATRIXES

A.N. Starchenko^a, V.G. Filippov^a, Yu.A. Yugai^a

^а“НИИ ОЭП” PLC, Sosnovy Bor, 188540, Russian Federation
Corresponding author: vlaffy@gmail.com

Article info

Received 22.03.17, accepted 16.06.17
doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-628-634
Article in Russian

For citation: Starchenko A.N., Filippov V.G., Yugai Yu.A. Sensitivity temperature dependence research of TV-cameras based on silicon matrixes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 628–634 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-628-634

Abstract

Subject of Research. The research is dedicated to the analysis of sensitivity change patterns of the cameras based on silicon CMOS-matrixes in various ambient temperatures. This information is necessary for the correct camera application for photometric measurements in-situ. The paper deals with studies of sensitivity variations of two digital cameras with different silicon CMOS matrixes in visible and near IR regions of the spectrum at temperature change. **Method.** Due to practical restrictions the temperature changes were recorded in separate spectral intervals important for practical use of the cameras. The experiments were carried out with the use of a climatic chamber, providing change and keeping the temperature range from minus 40 to plus 50 °C at a pitch of 10 °C. Two cameras were chosen for research: VAC-135-IP with OmniVision OV9121 matrix and VAC-248-IP with OnSemiconductor VITA2000 matrix. The two tested devices were placed in a climatic chamber at the same time and illuminated by one radiation source with a color temperature about 3000 K in order to eliminate a number of methodological errors. **Main Results.** The temperature dependence of the signals was shown to be linear and the matrixes sensitivities were determined. The results obtained are consistent with theoretical views, in general. The coefficients of thermal sensitivity were computed by these dependencies. It is shown that the greatest affect of temperature on the sensitivity occurs in the area (0.7–1.1) mkm. Temperature coefficients of sensitivity increase with the downward radiation wavelength increase. The experiments carried out have shown that it is necessary to take into account the changes in temperature sensitivity of silicon matrixes in the red and near in IR regions of the spectrum. The effect reveals itself in a clearly negative way in cameras with an amplitude resolution of 10-12 bits used for aerospace and space spectrozonal photography. **Practical Relevance.** The obtained values of temperature sensitivity coefficients enable to correct the received signals by means of a calculation and to obtain more reliable information on the photometric properties of scenes and objects.

Keywords

silicon matrix, digital camera, spectral sensitivity, sensitivity temperature change

Введение

Цифровые камеры на основе кремниевых матриц [1, 2] широко используются в разных сферах. Наиболее сложными и перспективными являются применения цифровых камер для решения фотометрических задач [3] в натуральных и цеховых условиях [4, 5]. В натуральных условиях при проведении уникальных исследований и экспериментов стабильность и детерминированность сигналов, формируемых камерами, приобретают решающую роль. Повсеместно действующим фактором, влияющим на работу камер, является температура окружающей среды. При этом производителями приводятся спектральные характеристики камер только для нормальных условий, а их энергетическая калибровка, согласно действующим стандартам, проводится в лабораторных условиях при температуре около 20 °C. Простым и в то же время затратным способом решения задачи является термостабилизация камеры. В частности, для поддержания работоспособности камер при отрицательных температурах используются обогреваемые кожухи. На производстве, связанном с выплавкой и обработкой металла, наоборот, камеры работают при повышенных температурах. Иногда их помещают в специальные боксы с водяным или воздушным охлаждением.

С другой стороны, знание реальных температурных зависимостей чувствительности позволяет оценивать аппаратные ошибки и в ряде случаев компенсировать их расчетным образом. Благодаря этому можно отказаться от громоздких вспомогательных устройств.

Результаты ранее выполненных исследований температурной зависимости чувствительности цифровой камеры на основе ПЗС-матрицы [6] показали, что в красном и ближнем инфракрасном участках спектра температурный коэффициент изменения чувствительности составляет 0,5–1,0 %/K.

Сегодня кремниевые матрицы, изготавливаемые по технологии ПЗС, повсеместно заменяются КМОП-приборами как в изделиях бытового назначения, так и в системах для научных исследований и технического зрения. Это обусловлено развитием КМОП-технологии и свойственной ей возможностью интегрировать на одной подложке фоточувствительные элементы, схемы управления и аналого-цифрового преобразования. При этом становятся доступными и все шире применяются монохромные и цветные камеры с амплитудным разрешением 10–12 бит. По чувствительности и пороговым характеристикам КМОП-приборы приближаются к ПЗС-матрицам [7–9].

Ввиду этого большой практический интерес представляет изучение влияния температуры окружающей среды на чувствительность КМОП-матриц.

Постановка задачи

Вопросы влияния температуры на чувствительность полупроводниковых приемников излучения рассматривались в разных работах [10–12]. Основным механизмом, приводящим к изменению чувствительности фотоприемников, считается размытие границ запрещенной зоны полупроводниковой структуры с ростом температуры. При этом у фотоприемников наблюдается сдвиг максимума чувствительности в сторону больших длин волн и подъем длинноволновой ветви спектральной чувствительности $S(\lambda)$.

Телевизионные матрицы представляют собой кремниевые структуры. Их свойства, вероятно, должны быть подобны свойствам кремниевых фотодиодов [13]. Ранее температурные зависимости чувствительности фотодиодов, применяемых в фотометрии, исследовались авторами отечественных работ [14, 15].

Корректную информацию по температурной зависимости чувствительности выпускаемых фотодиодов предоставляет японская фирма Hamamatsu¹. Эта фирма также производит широкую номенклатуру кремниевых линеек и матриц для научных исследований и измерительных установок. Однако данных по температурным вариациям чувствительности для этих приборов она не приводит.

Согласно существующему подходу, для описания температурной зависимости спектральной чувствительности $S(\lambda, T)$ применяют линейную модель, описываемую соотношением

$$S(\lambda, T) = S_0(\lambda) + a(\lambda) \cdot (T - T_0).$$

Здесь $S_0(\lambda)$ – спектральная чувствительность приемника в нормальных условиях при температуре $T_0 \approx 20^\circ\text{C}$, $a(\lambda)$ – эмпирическая зависимость. Искомые коэффициенты температурной чувствительности $k(\lambda)$ зависят от длины волны и оцениваются по формуле

$$k(\lambda) = 100 \cdot \frac{(S(\lambda, T)/S_0(\lambda) - 1)}{T - T_0}.$$

Коэффициенты $k(\lambda)$ имеют размерность процент на градус Цельсия [% / °C].

В силу практических ограничений построить непрерывную зависимость $k(\lambda)$ не удастся. В связи с этим коэффициенты температурной чувствительности определяют в участках рабочего спектрального диапазона конечной ширины $\Delta\lambda$.

Организация эксперимента

Для исследований были отобраны цифровые камеры VAC-135-IP и VAC-248-IP на КМОП-матрицах. Камеры были разработаны ООО «ЭВС» (г. Санкт-Петербург) по техническим требованиям АО «НИИ ОЭП». Камера VAC-135-IP построена на одной из первых КМОП-матриц фирмы OmniVision OV9121². Основной камеры VAC-248-IP является современная матрица фирмы OnSemiconductor VITA2000 (NOIV2SN2000A-QDC)³. Обе камеры используют интерфейс управления и передачи данных Ethernet 100Base-T и поддерживают программное управление временем накопления, коэффициентом усиления, показателем гамма-коррекции и др. Фотографии камер показаны на рис. 1.



Рис. 1. Фотографии цифровых камер на КМОП-матрицах: камера VAC-135-IP (а); камера VAC-248-IP (б)

На рис. 2 и 3 показаны спектральные зависимости чувствительности матриц OV9121 и VITA2000, взятые из документации фирм-производителей. Максимум чувствительности матрицы OV9121 лежит в области 750–780 нм, а матрицы VITA2000 – вблизи 650 нм.

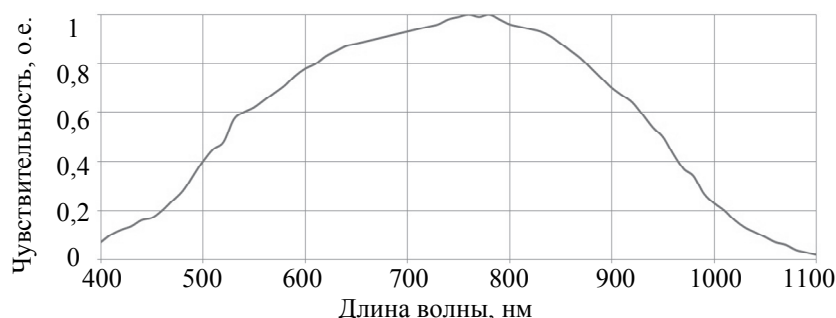


Рис. 2. Спектральная зависимость чувствительности матрицы OV9121

¹ Hamamatsu Si PIN photodiodes [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s11499_series_kpin1082e.pdf (Дата обращения 16.12.2016).

² OmniVision OV9121 B&W CMOS SXGA (1.3 MPixel) CameraChip [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.chipfind.ru/datasheet/pdf/ovt/ov9121.pdf> (Дата обращения 16.12.2016).

³ VITA 2000 CMOS Image Sensor [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.onsemi.ru.com/PowerSolutions/document/NOIV1SN2000A-D.PDF> (Дата обращения 16.12.2016).

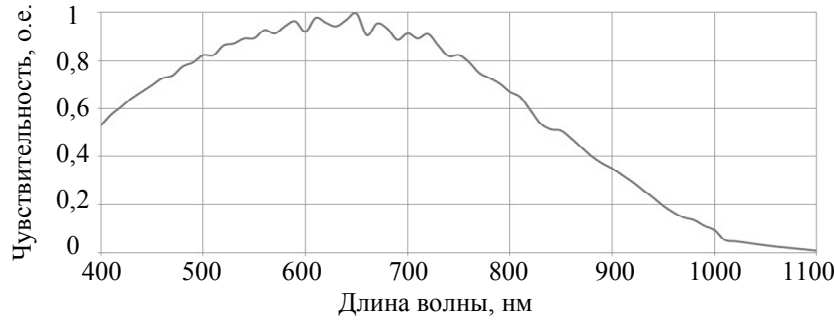


Рис. 3. Спектральная зависимость чувствительности матрицы VITA2000

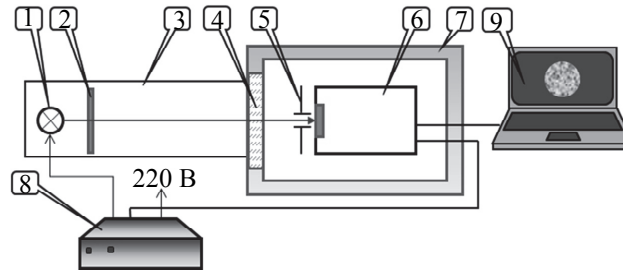


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

1 – галогенная лампа; 2 – сменный светофильтр; 3 – экран; 4 – входное окно климатической камеры MS-811R; 5 – диафрагма; 6 – исследуемая камера; 7 – климатическая камера; 8 – источник питания; 9 – портативный компьютер

Схема экспериментальной установки показана на рис. 4. На телекамерах вместо объективов были установлены диафрагмы диаметром 2 мм. Вывод кабелей подключения к компьютеру и источнику питания был реализован через герметичный переход. Обработка изображений выполнялась в разработанной авторами программе, позволяющей вычислять средние значения и среднеквадратические отклонения в двух прямоугольных областях, выбираемых оператором. В расчетах использовались значения, определяемые по разности отсчетов в освещенной и затененной областях кадра.

В качестве источника излучения применялась лампа накаливания мощностью 20 Вт с цветовой температурой около 3000 К. Лампа питалась от стабилизированного источника питания. С помощью светофильтров из цветных стекол ЗС8, КС18 и ИКС3 выделялись три участка спектра¹. Также фиксировались изображения и сигналы без светофильтра.

В ходе подготовки были выполнены оценки спектральных показателей, необходимых для проведения эксперимента и интерпретации результатов. Спектральные зависимости эффективных облученностей $E_{эфф}(\lambda)$ были рассчитаны согласно следующему соотношению:

$$E_{эфф}(\lambda) = E(\lambda) \cdot S_0(\lambda) \cdot t_{\phi}(\lambda).$$

Здесь $E(\lambda)$ и $S_0(\lambda)$ – относительные спектральные зависимости плотности облученности от лампы и чувствительности матрицы, $t_{\phi}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания фильтра. Зависимость $E(\lambda)$ была определена по модели, учитывающей температурный и спектральный ход коэффициента излучения вольфрама [16]. Спектры пропускания фильтров $t_{\phi}(\lambda)$ в диапазоне 300–1100 нм измерены на спектрофотометре СФ-56. По кривым $E_{эфф}(\lambda)$ были определены длины волн λ_{\max} , отвечающие максимуму зависимостей $E_{эфф}(\lambda)$, и их границам по уровню 0,5 от максимальных значений. Также были рассчитаны значения эффективной длины волны $\lambda_{эфф}$ и спектральной эффективности χ по формулам

$$\lambda_{эфф} = \frac{\int \lambda E_{эфф}(\lambda) d\lambda}{\int E_{эфф}(\lambda) d\lambda}, \quad \chi = \frac{\int E_{эфф}(\lambda) d\lambda}{\int E(\lambda) d\lambda}.$$

Значения спектральных показателей приведены в табл. 1 и 2.

Светофильтр	λ_{\max} , нм	$\lambda_{эфф}$, нм	$\Delta\lambda_{0,5}$, нм	χ , о.е.
ЗС 8	580	632	520–660	0,073
КС 18	780	835	685–965	0,420
ИКС 3	980	1000	920–1040	0,022
Без фильтра	780	796	630–950	0,620

Таблица 1. Значения спектральных показателей для камеры VAC-135-IP

¹ Цветное оптическое стекло и особые стекла. Каталог под ред. Г.Т. Петровского. М., «Дом оптики». 1990.

Светофильтр	$\lambda_{\text{макс}}$, нм	$\lambda_{\text{эфф}}$, нм	$\Delta\lambda_{0,5}$, нм	χ , о.е.
ЗС 8	560	588	495–640	0,095
КС 18	720	800	685–865	0,210
ИКС 3	980	995	915–1060	0,006
Без фильтра	690	708	545–855	0,430

Таблица 2. Значения спектральных показателей для камеры VAC-248

Фильтры выделяют три области с эффективными длинами волн 632, 835 и 1000 нм для камеры VAC-135-IP и 588, 800 и 995 нм для камеры VAC-248-IP. Согласно значениям спектральной эффективности χ , уровни ожидаемых сигналов различаются в 30 и 70 раз.

Две исследуемые телекамеры одновременно размещались в камере тепла и холода MC-811R (Espec Corp., Япония). Перед началом работы для каждой телекамеры были определены времена экспозиции, подходящие для работы с каждым из выбранных фильтров. В ходе эксперимента температура в камере менялась с шагом 10 °C от -40 °C до +50 °C. При каждой температуре фиксировались и обрабатывались получаемые изображения.

Обсуждение результатов эксперимента

Полученные в ходе эксперимента значения информативных сигналов представлены на графиках рис. 5, 6. Они отмечены маркерами. Сплошными линиями показаны аппроксимирующие зависимости.

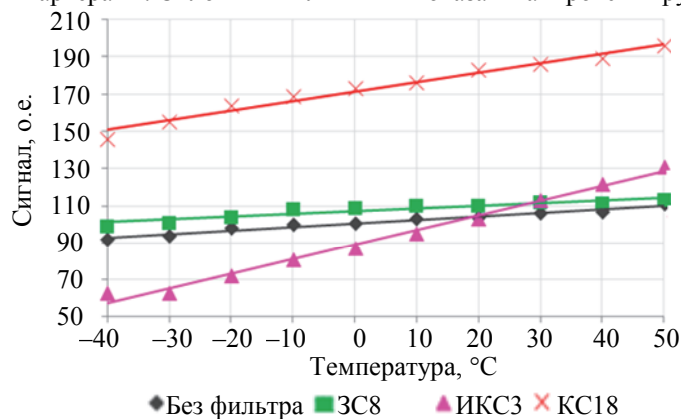


Рис. 5. Температурные зависимости сигналов камеры VAC-135-IP

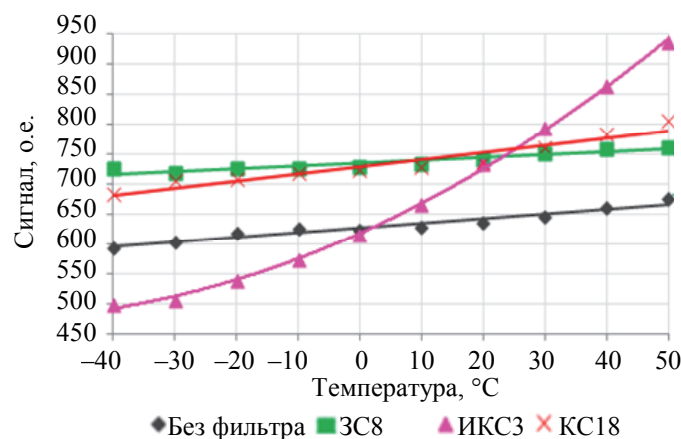


Рис. 6. Температурные зависимости сигналов камеры VAC-248-IP

Представленные зависимости позволяют сделать вывод о линейном характере изменений сигналов с ростом температуры. Искомый температурный коэффициент чувствительности определяется наклоном этих прямых.

Особый вид имеет зависимость сигнала камеры VAC-248-IP в ближнем инфракрасном участке спектра. Она заметно отличается от линейной и точно аппроксимируется полиномом второй степени (рис. 6). Это, вероятно, связано со спецификой поглощения в малоразмерных и тонких чувствительных элементах и сложной внутренней структурой активных элементов этой КМОП-матрицы VITA2000 [7, 17]. Для единообразия оценок в табл. 3 приведены температурные коэффициенты при аппроксимации прямыми.

Тип камеры	Спектральный диапазон, нм			
	VAC-135-IP	630–950 0,19	520–660 0,14	685–965 0,29
VAC-248-IP	545–855 0,13	495–640 0,06	685–865 0,16	915–1060 0,74

Таблица 3. Температурные коэффициенты чувствительности, %/K

У обеих камер температурные коэффициенты чувствительности возрастают при увеличении длины волны падающего излучения. Температурные изменения чувствительности камеры VAC-135-IP с матрицей OV9121 выше, чем камеры VAC-248-IP на матрице VITA2000.

При спектральном составе излучения, близком к участкам спектра $\Delta\lambda$ указанным в табл. 3, для коррекции сигналов камеры целесообразно пользоваться следующей формулой:

$$N = N(T) \cdot k(\Delta\lambda) / 100 \cdot (T - T_0),$$

где N – исправленный сигнал; $N(T)$ – сигнал при температуре среды T ; $k(\Delta\lambda)$ – температурный коэффициент чувствительности.

Заключение

Полученные температурные коэффициенты изменения чувствительности позволяют определять дополнительные погрешности измерения фотометрических параметров и корректировать результаты измерений при существенных вариациях температуры окружающей среды. Это особенно актуально при работе в ближнем инфракрасном диапазоне, где влияние температуры наиболее существенно. Пренебрежение температурным изменением чувствительности в этом диапазоне может приводить к ошибкам до 20–40%.

Анализ и сравнение полученных сведений и результатов для камеры на ПЗС-матрице [6] показывают, что температурные зависимости чувствительности кремниевых матриц не имеют принципиальных отличий и в целом подобны аналогичным зависимостям фотодиодов [10–12]. Но на характер температурной зависимости чувствительности телекамер оказывают влияние не сами технологии изготовления матричных фотоприемных устройств (ПЗС или КМОП), а особенности состава и концентрации примесей кремниевых чувствительных элементов матриц. Это необходимо учитывать при выборе телевизионных камер для использования в измерительной аппаратуре натурального применения.

Результаты исследований могут быть распространены и на цветные камеры на кремниевых матрицах, которые за счет специальных фильтров наряду с формированием обычных цветных изображений обеспечивают съемку в ближнем инфракрасном диапазоне.

Литература

1. Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. Учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
2. Вахромеева О.С., Манцветов А.А., Шиманская К.А. Характеристики чувствительности телевизионных камер на матричных приборах с зарядовой связью // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2004. № 4. С. 25–35.
3. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы). 2е изд. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
4. Павлов Н.И., Прилипко А.Я., Старченко А.Н. Метод и аппаратура для получения карт коэффициентов яркости объектов // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 6. С. 68–72.
5. Зотов А.А., Павлов Н.И., Саакян А.С., Сидоровский Н.В., Старченко А.Н., Филиппов В.Г. Исследование характеристик спектрально-зональной телевизионной фотометрической аппаратуры в пассивном режиме // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 2. С. 50–55.
6. Старченко А.Н., Филиппов В.Г., Югай Ю.А. Исследование температурной зависимости спектральной чувствительности телевизионной камеры на кремниевой матрице // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 10. С. 65–68.
7. Манцветов А.А., Цыцулин А.К. Телекамеры на КМОП-фотоприемниках // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2006. № 2. С. 70–89.
8. Шевердин А. Технологические инновации КМОП-камер OmniVision – оптимальный выбор для высокообъемных применений // Компоненты и технологии. 2008. № 78. С. 46–49.
9. Шевердин А. Технологические инновации КМОП-камер

References

1. Gorbachev A.A., Korotaev V.V., Yaryshev S.N. *Solid-State Matrix Photoconverters and Cameras Based on Them*. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2013, 98 p. (In Russian)
2. Vakhromeeva O.S., Mantsvetov A.A., Shimanskaya K.A. Sensitivity characteristics of charge coupled device cameras. *Izvestiya Vuzov. Radioelektronika*, 2004, no. 4, pp. 25–35. (In Russian)
3. Gurevich M.M. *Photometry: Theory, Methods and Instruments*. 2nd ed. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1983, 272 p. (In Russian)
4. Pavlov N.I., Prilipko A.Ya., Starchenko A.N. Method and apparatus for obtaining maps of the brightness coefficients of objects. *Journal of Optical Technology*, 2001, vol. 68, no. 6, pp. 68–72. (In Russian)
5. Zotov A.A., Pavlov N.I., Sakyan A.S., Sidorovskii N.V., Starchenko A.N., Filippov V.G. Investigation of the characteristics of spectrozonal television photometric apparatus in the passive regime. *Journal of Optical Technology*, 2006, vol. 73, no. 2, pp. 111–116.
6. Starchenko A.N., Filippov V.G., Yugai Yu.A. Study of the temperature dependence of the sensitivity of a television camera based on a silicon array. *Journal of Optical Technology*, 2013, vol. 80, no.10, pp. 632–634. doi: 10.1364/JOT.80.000632
7. Mantsvetov A.A., Tsytulin A.K. Cameras on CMOS photodetectors. *Voprosy Radioelektroniki. Seriya: Tekhnika Televideniya*, 2006, no. 2, pp. 70–89. (In Russian)
8. Sheverdin A. Technological innovations of OmniVision CMOS cameras - the best choice for large-scale applications.

- OmniVision – оптимальный выбор для высокообъемных применений // Компоненты и технологии. 2008. № 80. С. 56–59.
10. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / Под ред. Р.Дж. Кисса. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
 11. Справочник по инфракрасной технике / Под ред. У. Волф, Г. Цитис. Т. 3. М.: Мир, 1995. 606 с.
 12. Измерение параметров приемников оптического излучения / Под ред. Л.Н. Курбатова и Н.В. Васильченко. М.: Радио и связь, 1983.
 13. Rogalski A. *Infrared Detectors*. 2nd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 876 p.
 14. Игнат'ев В.Г., Воркачева Н.А. Результаты исследования некоторых метрологических характеристик кремниевых и германиевых фотодиодов // Импульсная фотометрия. 1984. № 8. С. 82.
 15. Кувалдин Э.В., Борисов В.А. Основные характеристики и методы испытаний измерительных фотодиодов // Импульсная фотометрия. 1984. № 8. С. 71.
 16. Вугман С.М., Вдовин Н.С. Тепловые источники излучения для метрологии. М.: Энергоатомиздат, 1988. 80 с.
 17. Ильин А.А., Овчинников А.М., Овчинников М.Ю. Принцип работы и устройство активно-пиксельных датчиков // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2003. 25 с.
9. Sheverdin A. Technological innovations of OmniVision CMOS cameras - the best choice for large-scale applications. *Components & Technologie*, 2008, no. 80, pp. 56–59. (In Russian)
 10. *Optical and Infrared Detectors*. Eds. R.J. Keyes. Springer, 1977.
 11. *Handbook of Infrared Technology*. Eds. W.L. Wolfe, G.J. Zissis. ERIM, 1993.
 12. *Measurement of the Parameters of Optical Radiation Receivers*. Eds. L.N. Kurbatov, N.V. Vasil'chenko. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1983.
 13. Rogalski A. *Infrared Detectors*. 2nd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011, 876 p.
 14. Ignat'ev V.G., Vorkacheva N.A. Research results of some metrological characteristics of silicon and germanium photodiodes. *Impul'snaya Fotometriya*, 1984, no. 8, pp. 82. (In Russian)
 15. Kuvaldin E.V., Borisov V.A. Main characteristics and test methods for measuring photodiodes. *Impul'snaya Fotometriya*, 1984, no. 8, p. 71. (In Russian)
 16. Vugman S.M., Vdovin N.S. *Thermal Radiation Sources for Metrology*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 80 p. (In Russian)
 17. Il'in A.A., Ovchinnikov A.M., Ovchinnikov M.Yu. *Principle of Operation and Structure of Active-Pixel Sensors*. M.V. Keldysh IAM Preprints, 2003, 25 p. (In Russian)

Авторы

Старченко Алексей Николаевич – кандидат технических наук, начальник отдела, АО «НИИ ОЭП», Сосновый Бор, 188540, Российская Федерация, anstar2000@mail.ru

Филиппов Владимир Геннадьевич – старший научный сотрудник, АО «НИИ ОЭП», Сосновый Бор, 188540, Российская Федерация, vlaffy@gmail.com

Югай Юлия Анатольевна – инженер 1 кат., АО «НИИ ОЭП», Сосновый Бор, 188540, Российская Федерация, yugai_yuliya@mail.ru

Authors

Alexey N. Starchenko – PhD, Chief of department, “NII OEP” PLC, Sosnovy Bor, 188540, Russian Federation, anstar2000@mail.ru

Vladimir G. Filippov – Senior scientific researcher, “NII OEP” PLC, Sosnovy Bor, 188540, Russian Federation, vlaffy@gmail.com

Yuliya A. Yugai – 1st rank engineer, “NII OEP” PLC, Sosnovy Bor, 188540, Russian Federation, yugai_yuliya@mail.ru