



УДК 621.397

Д. А. Белоус

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Оптимизация режима работы твердотельного фотоприемника в ближнем инфракрасном участке спектра

Показано теоретически и подтверждено экспериментально увеличение квантовой эффективности кремниевых фотоприемников в ближнем инфракрасном участке спектра 900...1100 нм при повышении температуры кристалла. Увеличение вызвано уменьшением ширины запрещенной зоны кремния при повышении температуры кристалла от 50 до 130 °С. Экспериментальное исследование темновых токов показало, что для КМОП-сенсоров фирмы "Sony" их значение аномально мало вплоть до температуры 130 °С. Таким образом, возможна оптимизация температуры кристалла фотоприемника по критерию отношения "сигнал/шум". Установлено, что при повышении температуры кристалла до 80...120 °С отношение "сигнал/шум" на длине волны 1064 нм увеличивается в 2–3 раза.

КМОП-сенсор, инфракрасный участок спектра, квантовая эффективность, темновой ток, лидар

В современных лидарных системах часто используются лазеры с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, лежащей в ближней инфракрасной (ИК) области спектра [1]. Это связано с существованием окна прозрачности атмосферы на указанной длине волны и меньшим рассеянием ИК-излучения на аэрозолях [2]. К тому же существуют мощные импульсные и непрерывные лазеры на алюмоиттриевом гранате (YAG) с длиной волны излучения 1064 нм, способные генерировать наносекундные импульсы с частотой до сотен герц и энергией в единицы и более джоулей.

В телевизионно-лазерных системах используются, как правило, стробируемые электронно-оптические преобразователи (ЭОП), сочлененные с твердотельным фотоприемником (ФП). Использование ЭОП приводит к излишнему усложнению системы, резкому повышению ее стоимости, снижению надежности и долговечности.

В то же время современные твердотельные ФП, работающие в режиме электронного затвора, позволяют достичь времени экспозиции, соизмеримого со стробируемым ЭОП. Так, на матричном ПЗС ICX429ALL фирмы "Sony" получено время накопления 20 нс [3]. Современные КМОП-сенсоры указанной фирмы имеют режим работы Fast Trigger, время накопления в котором составляет 50 нс [4]. Однако квантовая эффективность (quantum effi-

ciency – QE) как матричных ПЗС, так и КМОП-сенсоров на длине волны 1064 нм невелика и составляет, как правило, единицы процентов.

При температуре 50 °С значение QE на длине волны 1112 нм становится равным нулю, поскольку данная длина волны является красной границей внутреннего фотоэффекта кремния.

В [5] показано, что с увеличением температуры кристалла кремния ширина его запрещенной зоны (ЗЗ) уменьшается, что приводит к повышению QE в ближней ИК-области спектра. С другой стороны, рост температуры приводит к возрастанию шумов фотоприемника. Современные КМОП-сенсоры характеризуются незначительным уровнем темновых токов [6], в связи с чем могут функционировать при высоких температурах. В связи с этим становится возможной оптимизация температурного режима КМОП-сенсора с целью повышения отношения "сигнал/шум" при работе в ближней ИК-области спектра, в частности, на длине волны 1064 нм. Целью настоящей статьи является поиск оптимального температурного режима кристалла КМОП-сенсора, обеспечивающего максимум отношения "сигнал/шум" при работе на указанной длине волны.

Зависимость ширины ЗЗ (E_g) описывается формулой Варшни [7]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta},$$

где T – абсолютная температура; α – температурный коэффициент изменения ширины $3\bar{3}$; β – константа смещения шкалы температуры.

В 2004 г. в Физико-техническом институте имени А. Ф. Иоффе РАН получены с высокой точностью значения коэффициента и константы в формуле Варшни для разных типов полупроводников (табл. 1) [8].

Таблица 1

Полупроводник	$E_g(0)$	α , мэВ/К	β , К
GaN	3.470	0.770	600
GaP	2.340	0.620	460
GaAs	1.519	0.541	204
InP	1.425	0.450	327
Si	1.170	0.473	636
Ge	0.744	0.477	235

При подстановке значений констант для кремния, полученных в [8], формула Варшни приобретает вид

$$E_g(T) = 1.170 - \frac{4.73 \cdot 10^{-4} T^2}{T + 636}.$$

Зависимость ширины $3\bar{3}$ кремния от температуры¹ (рис. 1) показывает, что с увеличением температуры скорость уменьшения ширины $3\bar{3}$ кремния несколько возрастает.

В твердотельных ФП значение QE определяется многими факторами, такими как коэффициент отражения поверхности кремния, наличие и материал микролинзы, глубина обедненной области кремния, объемная плотность легирующих примесей и т. д. Кроме того, в диапазоне длин волн 900...1100 нм значение QE во многом определяется шириной $3\bar{3}$.

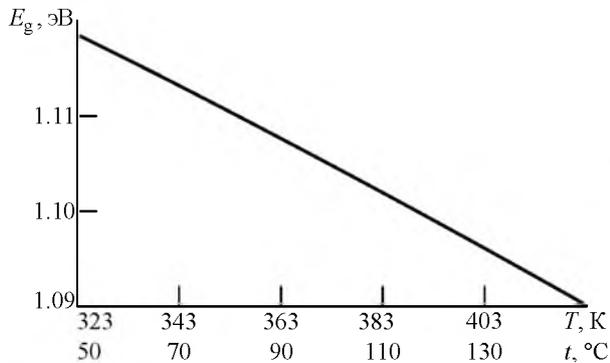


Рис. 1

¹ Для повышения наглядности на температурных зависимостях выполнена дополнительная разметка оси температур согласно соотношению $t [^\circ\text{C}] = T [\text{K}] - 273$.

Для оценки вероятности того, что фотон определенной длины волны сгенерирует электрон, который преодолет $3\bar{3}$ кремния, найдена зависимость отношения энергии фотона к ширине $3\bar{3}$ кремния (табл. 2) [5]. Расчеты выполнены для температуры 50 °С. Энергия фотона определена в соответствии с формулой Планка

$$E_{\text{ph}}(\lambda) = hc/\lambda,$$

где $h = 4.315 \cdot 10^{-15}$ эВ·с – постоянная Планка; $c = 3.0 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Таблица 2

λ , нм	900	940	980	1020	1060	1100
$E_{\text{ph}}(\lambda)/E_g(323)$	1.223	1.181	1.156	1.132	1.110	1.009

Таким образом, с ростом температуры ширина $3\bar{3}$ кремния уменьшается, а отношение $E_{\text{ph}}(\lambda)/E_g(T)$ при фиксированной длине волны увеличивается, что приводит к росту QE.

Результаты расчета температурных зависимостей квантовой эффективности на длинах волн 940 и 1064 нм [5] представлены на рис. 2. Кривые 1 построены для матричного ПЗС (МПЗС) со строчным переносом ICX429ALL фирмы "Sony" [9], содержащего 752×582 пиксела размером 8.3×8.6 мкм; кривые 2 – для КМОП-сенсора с бегущим затвором IMX136LLJ той же фирмы [10] с числом пикселей 1920×1200 размером 2.8×2.8 мкм.

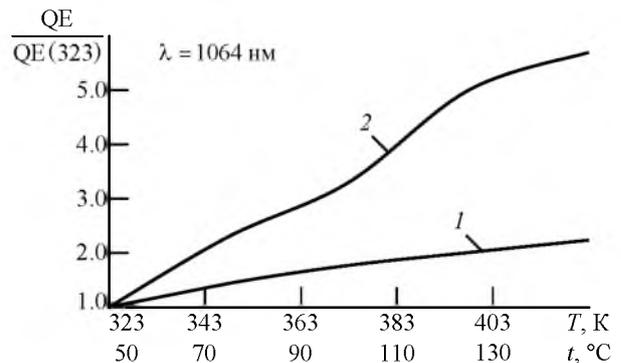
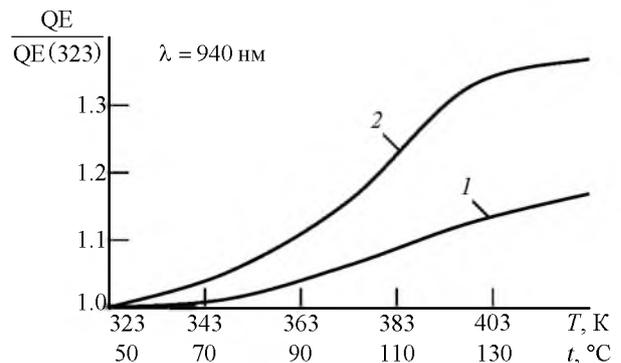


Рис. 2

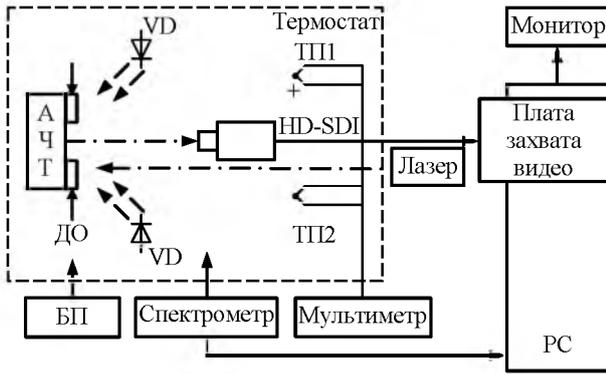


Рис. 3

На длине волны 1064 нм при температуре 130 °С выигрыш по отношению к квантовой эффективности при температуре 323 К (50 °С) составляет до 2 раз для МПЗС и до 5 раз для КМОП-сенсора.

Для проверки результатов теоретического расчета разработан экспериментальный стенд (рис. 3). Стенд содержит термостат, в котором для реализации черно-белого перепада, по которому измерялось значение видеосигнала, располагались модель абсолютно черного тела (АЧТ) и диффузный отражатель (ДО), освещаемые рядом ИК-светодиодов VD с максимумами длины волны излучения 940 и 1050 нм, а также непрерывным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм. В термостате расположена черно-белая телевизионная камера (ТВК), выполненная на КМОП-сенсоре с бегущим затвором IMX136LLJ фирмы "Sony" с интерфейсом HD-SDI. У ТВК отключались все автоматические регулировки, устанавливался режим $\gamma = 1$. Время накопления составляло 20 мс или 2.5 мс. Выходной сигнал ТВК передавался на плату захвата видео, установленную в персональном компьютере (PC).

Температура в термостате изменялась в диапазоне 50...130 °С и контролировалась термопарами ТП1 и ТП2, подключенными к мультиметру.

Питание всех устройств осуществлялось от блока питания БП.

На рис. 4 приведены результаты эксперимента, которые показывают рост амплитуды выходного сигнала ФП относительно сигнала при температуре 323 К (50 °С), обусловленный увеличением QE с повышением температуры при работе в ближнем ИК-диапазоне для длин волн 940, 1050 и 1064 нм.

При работе на длине волны 1064 нм и температуре 130 °С увеличение QE составило 4 раза, что близко к теоретически полученному значению. Таким образом, влияние уменьшения ширины ЗЗ при повышении температуры на повышение QE

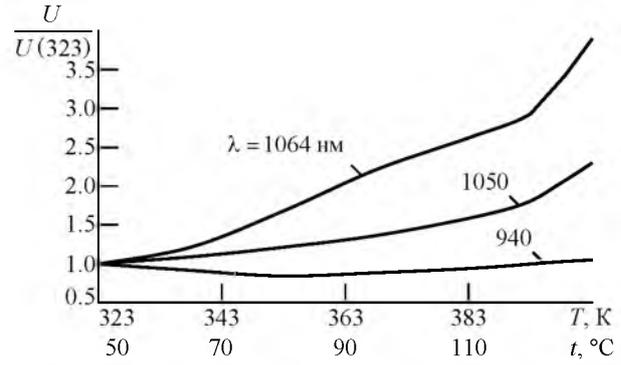


Рис. 4

достаточно велико и может быть использовано для оптимизации температурного режима работы ФП.

Перейдем к рассмотрению шумов ФП. Известно, что темновые токи КМОП-сенсоров фирмы "Sony" как с бегущим, так и с глобальным затвором очень малы даже при высокой температуре [11], [12].

Число электронов, генерированных темновым током, определяется как [13]

$$n_{Т.Т} = j_{Т.Т} \tau_H A / q,$$

где $j_{Т.Т}$ – плотность темнового тока; τ_H – время накопления; $A = \Delta x \Delta y$ – площадь светочувствительного элемента; $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Так как электроны темнового тока возникают вследствие случайной термогенерации, их число, зафиксированное за τ_H , описывается распределением плотности вероятности Пуассона [14]. Для распределения Пуассона дисперсия численно равна среднему значению. Тогда дробовые шумы, измеряемые среднеквадратическим отклонением (СКО) числа шумовых электронов, связанных с термогенерацией темнового тока, определяются как

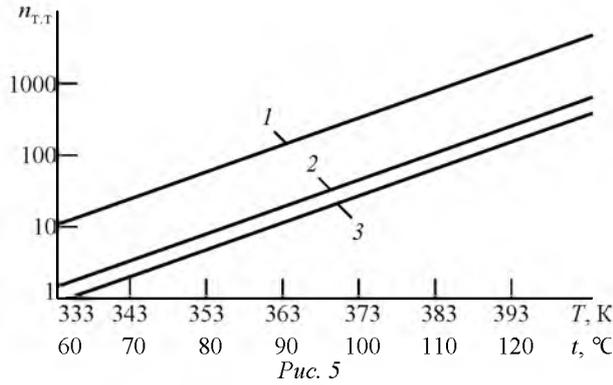
$$\bar{n}_{ш.Т.Т} = \sqrt{n_{Т.Т}} = \sqrt{j_{Т.Т} \tau_H A / q}.$$

При этом СКО результирующего шума ФП при наличии темнового заряда, выраженное в числе электронов, будет определено как

$$\bar{n}_{ш} = \sqrt{\bar{n}_{ш.Т.Т}^2 + \bar{n}_{ш.сч}^2},$$

где $\bar{n}_{ш.сч}$ – собственные шумы ФП при отсутствии темнового заряда.

На рис. 5 представлены теоретические расчеты числа электронов темнового тока, выполненные по паспортным данным для МПЗС ICX429ALL (кривая 1), КМОП-сенсоров ICX136LLJ (кривая 2) и IMX265LLR фирмы "Sony" (кривая 3) [9], [10], [15]. Полученные средние значения темнового за-



ряда вплоть до температуры 130 °С не превосходят динамического диапазона ФП.

На описанном ранее экспериментальном стенде (рис. 3) проведено исследование темновых токов указанных ранее ФП в диапазоне температур 50...130 °С. По последовательности кадров рассчитаны зависимости среднего количества электронов темнового тока (рис. 6) для времен накопления: 20 и 2.5 мс.

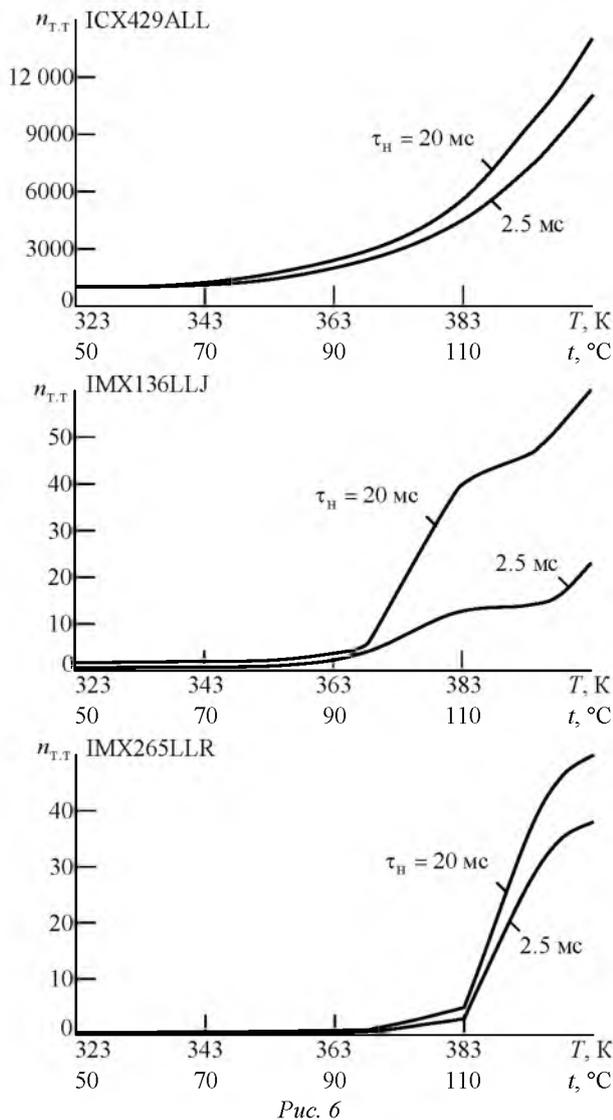


Рис. 6

Темновой ток МПЗС при температуре 130 °С составил более 10 000 электронов и незначительно уменьшился при включении электронного затвора со временем накопления 2.5 мс. Это объясняется тем, что большая часть темновых электронов генерируется в вертикальных ПЗС-регистрах, на процессы в которых режим электронного затвора не влияет [6].

Значения темновых токов КМОП-сенсоров оказались существенно ниже расчетных. Однако известно, что реальные эксплуатационные характеристики ФП (число темновых электронов, диапазон рабочих напряжений, диапазон рабочих температур и др.) имеют многократный запас по сравнению с приведенными паспортными данными [6].

На рис. 7 приведены экспериментальные зависимости среднего количества электронов темнового тока от температуры, снятые для двух значений времени накопления. Уменьшение времени накопления существенно снижает уровень шума, но непропорционально изменению времени накопления. Это обусловлено тем, что с ростом температуры растут все составляющие шумов (шум сброса, тепловой шум и т. д.) [16].

Анализируя совместно температурные зависимости роста QE и СКО шума можно сделать вывод о том, что существует оптимальное значение температуры кристалла ФП по критерию отношения "сигнал/шум" Ψ .

На рис. 8 представлены зависимости относительного увеличения этого отношения при увели-

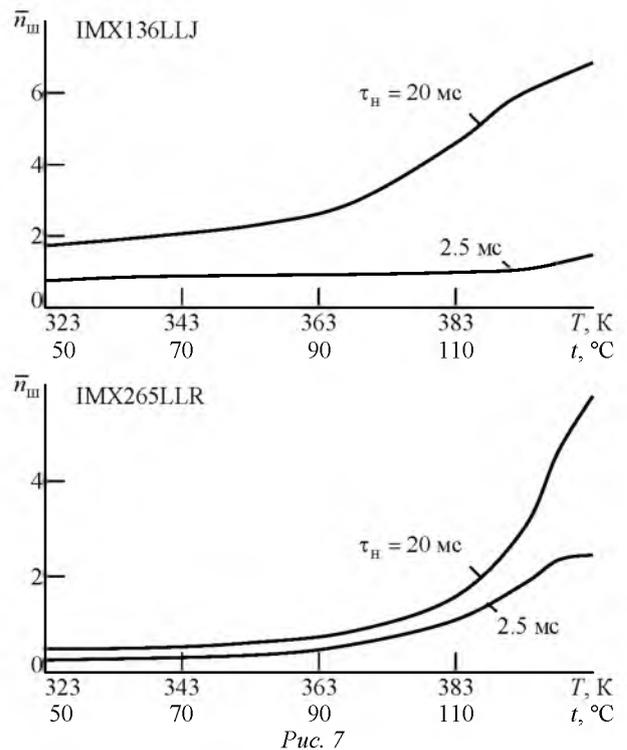


Рис. 7

чении температуры для двух времен накопления КМОП-сенсора ICX136LLJ фирмы "Sony". Из них следует, что для времени накопления 20 мс оптимальным является температура кристалла 80 °С, а при включении электронного затвора ($\tau_H = 2.5$ мс) это значение возрастает до 120 °С. При этом выигрыш в отношении "сигнал/шум" в первом режиме составляет 1.9 раза, во втором – 3.4 раза.

Таким образом, оптимизация температурного режима работы твердотельного ФП приводит к повышению пороговой чувствительности при малых значениях полезного сигнала. При больших значениях сигнала определяющим компонентом

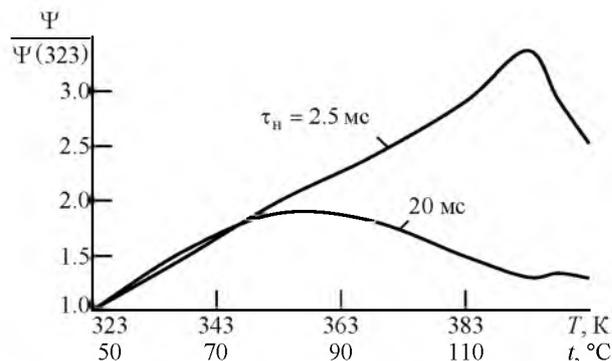


Рис. 8

будет фотонный шум и выигрыш будет пропорционален росту QE при рабочей температуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pat. RU 2 022 251 C1. G01N21/61 (1990.01). Лидарный комплекс контроля загрязнения воздуха / А. В. Козырев, В. Д. Шаргородский; опублик. 10.10.1994. Бюл. № 3.
2. Кац Я. Г., Рябухин А. Г. Космическая геология. М.: Просвещение, 1984. 80 с.
3. Управление режимом накопления в твердотельных фотоприемниках / А. А. Умбиталиев, А. К. Цыцулин, А. А. Манцветов, В. В. Козлов, А. Е. Рычажников, П. С. Баранов, А. В. Иванова // Опт. журн. 2012. Т. 79, № 11. С. 84–92.
4. URL: http://www.sony-semicon.co.jp/products_en/new_pro/february_2016/imx253_255_e.html (дата обращения 06.05.2017).
5. Белоус Д. А. Чувствительность твердотельных фотоприемников в ближней инфракрасной области спектра при высокой температуре // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2017. Вып. 2. С. 41–47.
6. Анализ количества темновых электронов твердотельных фотоприемников при высокой рабочей температуре / К. В. Стрижнев, Д. А. Белоус, П. С. Баранов, В. Т. Литвин, А. А. Манцветов, В. А. Михайлов // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2017. Вып. 2. С. 31–40.
7. Varshni Y. P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors // Physica. 1967. Vol. 34, № 1. P. 149–154.
8. Physical properties of semiconductors / Ioffe Physico-Technical Institute (Saint Petersburg, Russia). URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond> (дата обращения 06.05.2017).
9. URL: www.npk-photonica.ru/images/icx429all2.pdf (дата обращения 06.05.2017).
10. URL: http://www.sony-semicon.co.jp/products_en/IS/sensor0/img/product/cmos/imx136lqj_llj.pdf (дата обращения 06.05.2017).
11. Durini D. High Performance Silicon Imaging. Fundamentals and Applications of CMOS and CCD Image Sensor. Amsterdam: Elsevier. Woodhead Pub., 2014. 450 p.
12. Image sensors and signal processing for digital still cameras / ed. by J. Nakamura Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 2006. 322 p.
13. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Основы физики приборов с зарядовой связью. М.: Наука, 1986. 318 с.
14. Приборы с зарядовой связью; под ред. М. Хоувза и Д. Моргана; пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1981. 376 с.
15. URL: http://www.npk-photonica.ru/images/imx264_265-pdf121219.pdf (дата обращения 06.05.2017).
16. Манцветов А. А. Чувствительность КМОП-фотоприемников с активным пикселем // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2014. Вып. 2. С. 18–24.

Статья поступила в редакцию 3 мая 2017 г.

Для цитирования: Белоус Д. А. Оптимизация режима работы твердотельного фотоприемника в ближнем инфракрасном участке спектра // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 3. С. 60–65.

Белоус Дарья Андреевна – бакалавр техники и технологии по направлению "Радиотехника" (2015), инженер кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 5 научных работ. Сфера научных интересов – твердотельные фотоприемники и телевизионные камеры на их основе.
E-mail: belous8890@gmail.com

D. A. Belous

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Optimization of an Operation Mode of the Solid-State Image Sensor in a Short-Wave Infrared Region

Abstract. Increase in quantum efficiency of silicon image sensor in the short-wave infrared range 900...1100 nm is shown theoretically and confirmed experimentally in case of temperature increase of a crystal. This increase is caused by reduction of width of the forbidden band of silicon in case of temperature increase of a crystal from +50 °C to +130 °C. The experimental study of the dark currents showed that for CMOS-sensors of Sony their value anomalously small up to temperature of +130 °C. Thus, optimization of temperature of a crystal of the image sensor by criterion of the relation signal/noise is possible. It is set that in case of temperature increase of a crystal to +80 °C...+120 °C the relation signal/noise by operation on wavelength of 1064 nanometers increases in 2 ... 3 times.

Key words: CMOS-sensor, short-wave infrared range, quantum efficiency, the dark current, lidar

REFERENCES

1. Kozyrev A. B., Shargorodsky V. D. *Lidarnyy kompleks kontrolya zagryazneniya vozdukha* [Lidar complex for air pollution control]. Patent RF, no. 2022251, 1994. (In Russian)
2. Kats Ya. G., Ryabukhin A. G. *Kosmicheskaya geologiya* [Space geology]. Moscow, *Prosveshchenie*, 1984, 80 p. (In Russian)
3. Umbitaliev A. A., Tsytsulin A. K., Mantsvetov A. A., Kozlov V. V., Rychazhnikov A. E., Baranov P. S., Ivanova A. V. *Upravlenie rezhimom nakopleniya v tverdotel'nykh fotopriemnikakh* [Control of accumulation mode in solid-state photodetectors]. *J. of Optical Technology*, 2012, vol. 79, no. 11. pp. 84–92. (In Russian)
4. Available at: http://www.sony-semicon.co.jp/products_en/new_pro/february_2016/imx253_255_e.html (accessed: 06 May 2017). (In Russian)
5. Belous D. A. Sensitivity of solid-state photodetectors in near infrared spectrum at high temperature. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya* [Questions of radio electronics. Ser. Technique of television]. 2017, no. 2, pp. 41–47. (In Russian)
6. Strizhnev K. V., Belous D. A., Baranov P. S., Litvin V. T., Mantsvetov A. A., Mikhailov V. A. Analysis of the amount of dark electrons of solid-state photodetectors at high operating temperature. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya* [Questions of radio electronics. Ser. Technique of television]. 2017, no. 2, pp. 31–40. (In Russian)
7. Varshni Y. P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. *Physica*. 1967, vol. 34, no. 1, pp. 149–154.
8. Physical properties of semiconductors / Ioffe Technical Institute (Saint Petersburg, Russia). Available at: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond> (accessed: 6 May 2017). (In Russian)
9. Available at: www.npk-photonica.ru/images/icx429all2.pdf (accessed: 6 May 2017). (In Russian)
10. Available at: http://www.sony-semicon.co.jp/products_en/IS/sensor0/img/product/cmox/imx136lqj_llj.pdf (accessed: 6 May 2017).
11. Durini D. High Performance Silicon Imaging. Fundamentals and Applications of CMOS and CCD Image Sensor. Amsterdam, Elsevier, Woodhead Pub., 2014, 450 p.
12. Image sensors and signal processing for digital still cameras; ed. by J. Nakamura Boca Raton, FL, USA, CRC Press, Inc., 2006, 322 p.
13. Nosov Yu. R., Shilin V. A. *Osnovy fiziki priborov s zaryadovoi svyaz'yu* [Basic physics of charge-coupled devices]. Moscow, *Nauka*, 1986. 318 p.
14. Charge-Coupled Devices and Systems; ed. by M. J. Howes, D. V. Morgan. Chichester, New York, John Wiley and Sons Ltd., 1979.
15. Available at: http://www.npk-photonica.ru/images/imx264_265-pdf121219.pdf (accessed: 6 May 2017).
16. Mantsvetov A. A. Sensitivity of CMOS active pixel photodetectors. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika televideniya* [Questions of radio electronics. Ser. Technique of television]. 2014, no. 2. pp. 18–24.

Received May, 03, 2017

For citation: Belous D. A. Optimization of an Operation Mode of the Solid-State Image Sensor in a Short-Wave Infrared Region. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 3, pp. 60–65. (In Russian)

Darya A. Belous – Bachelor of technique and technology for the Radio technology (2015) direction, the engineer of department of Radio-electronic means of Saint Petersburg State Electrotechnical university "LETI". The author of five scientific publications. The area of scientific interests – image sensors and TV cameras on their basis. E-mail: belous8890@gmail.com