

РАСЧЕТ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИЕМНИКА, СОГЛАСОВАННОЙ С НОРМАЛЬНЫМ ОБЪЕКТИВОМ

А. М. Безуглый*, А. В. Бахолдин, Т. В. Точилина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

** ambezuglyi@itmo.ru*

Аннотация. Решаются задачи исследования и расчета параметров криволинейной фоточувствительной поверхности приемника, согласованной с распространенным нормальным объективом. Под нормальными понимаются объективы с заданным полем изображения средних размеров. Проанализирован линзовый объектив с разной формой поверхности изображения. Методом наименьших квадратов получено уравнение аппроксимирующей функции кривой, соответствующей форме поверхности изображения выбранного объектива. При помощи построенных диаграмм прочности деформации объекта оценены прочностные характеристики фоточувствительной поверхности приемника криволинейной формы. Криволинейная фоточувствительная поверхность приемника обеспечивает снижение влияния aberrации кривизны поля в выбранном объективе, уменьшение размеров пятен рассеяния на краю поля в два раза, а следовательно, получение изображения наилучшего качества. Результаты численного моделирования найдут свое применение в проектировании технологии изготовления криволинейной фоточувствительной поверхности, а также при согласовании допустимых значений отклонений, которые проявляются в процессе разработки. Рассмотренная последовательность расчета параметров криволинейной фоточувствительной поверхности приемника может быть применена при проектировании оптических систем и приемных модулей, что позволит упростить создание изображения на фоточувствительной поверхности приемника и снизить влияние кривизны поля без использования линзовых компенсаторов.

Ключевые слова: расчет оптических систем, криволинейная фоточувствительная поверхность приемника, нормальный объектив, ФПЗС, КМОП-приемник, прочностные характеристики фотоприемных устройств

Ссылка для цитирования: Безуглый А. М., Бахолдин А. В., Точилина Т. В. Расчет криволинейной фоточувствительной поверхности приемника, согласованной с нормальным объективом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 511–518. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-511-518.

CALCULATION OF A CURVILINEAR PHOTOSENSITIVE SURFACE OF THE RECEIVER, MATCHED WITH A NORMAL LENS

A. M. Bezuglyi*, A. V. Bakholdin, T. V. Tochilina

ITMO university, St. Petersburg, Russia

** ambezuglyi@itmo.ru*

Abstract. The problems of studying and calculating the parameters of a curved photosensitive surface of the receiver, matched with a common normal lens, are solved. Lenses with a given image field of medium size are considered normal. Lenses with different shapes of the image surface are analyzed. Using the least squares method, an equation for the approximating function of the curve corresponding to the shape of the image surface of the selected lens is obtained. Diagrams of the deformation strength of the object are constructed to assess the strength characteristics of the photosensitive surface of the curvilinear receiver. The curved photosensitive surface of the receiver reduces the influence of field curvature aberration in the selected lens, diminishes the size of scattering spots at the edge of the field by half, and therefore ensures the best quality image. Results of numerical modeling may be applied in the design of technology for manufacturing a curved photosensitive surface, as well as in agreeing on the permissible values of deviations that appear during the development process. The considered sequence for calculating the receiver curved photosensitive surface parameters can be used in the design of optical systems and receiving modules to simplify the

creation of an image on the photosensitive surface of the receiver and reduce the influence of field curvature without the implementation of lens compensators.

Keywords: optical systems calculation, curvilinear photosensitive receiver surface, normal lens, CCD, CMOS receiver, strength characteristics of photodetectors

For citation: Bezuglyi A. M., Bakholdin A. V., Tochilina T. V. Calculation of a curvilinear photosensitive surface of the receiver, matched with a normal lens. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 511–518 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-511-518.

Введение. На разработку приемных оптических модулей, которые применяются в различных сферах, уходит большое количество материальных и временных ресурсов. Это связано с трудоемкостью проектирования приемного тракта, в состав которого входят оптическая система (линзовый или зеркальный объектив) и фотоприемное устройство. Создание изображения на плоских фоточувствительных поверхностях в оптических системах — достаточно сложная задача. Конструкционные параметры объективов обусловлены использованием приемников с плоской фоточувствительной поверхностью. Для уменьшения количества требований к оптике предлагается ввести в систему приемник с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы. Преимущества приемного тракта с криволинейной фоточувствительной поверхностью заключаются в том, что, по сравнению с плоской, в ней увеличивается поле изображения и корректируется абберация типа „кривизна поля“. Благодаря этому на криволинейных фоточувствительных поверхностях достигается лучшее качество изображения. Снижение требований к оптической системе позволяет уменьшить габаритные размеры объективов и число оптических элементов в их составе, что, в свою очередь, дает возможность сократить себестоимость прибора и время на его разработку.

Большое количество зарубежной литературы посвящено исследованию возможностей применения приемников с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы [1–8]. Крупными зарубежными организациями были использованы результаты научных трудов в космических аппаратах, таких как телескопы „Kepler“, „TESS“ (США). Разработчикам удалось снизить требования к оптической системе путем установки матриц ПЗС на криволинейную поверхность с индивидуальной оптикой. В зарубежных работах [1–4] описываются технологии, позволяющие уменьшить толщину приемника и, при воздействии направленной силы на утоненный приемник, получить неплоскую форму фоточувствительной поверхности. Отечественный опыт разработки и установки приемников на криволинейную поверхность сильно ограничен.

Целью настоящей работы является исследование параметров криволинейной фоточувствительной поверхности приемника, согласованной с нормальным объективом*, и их расчет. При расчете оптической системы конструктивные параметры объектива не изменяются. На основании полученных результатов моделирования была оценена технологическая возможность изготовления приемника (ФПЗС или КМОП-приемник) с криволинейной фоточувствительной поверхностью.

Анализ линзовых объективов с разными формами фокальной плоскости. Открытие Петцвалем [9] искривленного поля показало перспективы применения криволинейной фокальной плоскости, кривизна которой зависит от показателя преломления и радиусов кривизны оптических поверхностей. Эта абберация называется кривизной поля Петцваля и является четвертой суммой из числа коэффициентов Зейделя [10] аббераций третьего порядка. Сумма Петцваля выражается по следующей формуле:

$$\Sigma_{\text{Pet}} = \sum \frac{n_{i+1} - n_i}{r_i n_{i+1} n_i},$$

где n — показатель преломления среды, в которой находится падающий луч; r — радиус кривизны поверхности. Эта формула накладывает ограничения на конструктивные параметры объек-

* ГОСТ 25205-82. Термины и определения. Фотоаппараты и съемочные фотографические объективы. М., 1982. 15 с.

тивов. Коррекция этой aberrации осуществляется с помощью оптических элементов, например, линзами Смита [11]. Линзы Смита [9] корректируют кривизну изображения путем минимизации суммы Петцваля до уровня, когда форма фокальной плоскости становится плоской [12].

Для исследования был выбран линзовый объектив Петцваля, состоящий из двух тонких ахроматов. В этом объективе исправлены кома, сферическая и хроматическая aberrации. Особенно сильные искажения вносит кривизна поля, эта aberrация вызывает сильное падение разрешения на краях поля изображения и ограничивает угол поля зрения. Для коррекции кривизны поля в объективах проектируют оптическую систему с отрицательными линзами, с уменьшенными радиусами кривизны поверхности оптических элементов и с применением линз большой толщины. Исправление этой aberrации описанными методами неизбежно приводит к трудностям в разработке конструкции и увеличению массы и габаритов объектива. В качестве альтернативного способа корректировки кривизны поля предлагается использовать приемник с криволинейной фоточувствительной поверхностью.

Сравнительный анализ выбранного объектива с плоской и неплоской поверхностью изображения (ПИ) выполнен в программе расчета оптических систем Zemax. Характеристики выбранного объектива Петцваля:

- 1) фокусное расстояние $f' = 100$ мм;
- 2) диафрагменное число $k = 4,5$;
- 3) угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 26^\circ$;
- 4) спектральный диапазон F', d', C' .

Для выявления преимуществ неплоской поверхности в конструктивные параметры объектива вводятся изменения: задается криволинейная ПИ. Путем оптимизации выбирается наилучшее значение радиуса кривизны поверхности ПИ на основании качества изображения. В программе Zemax были получены следующие результаты: ход лучей приведен на рис. 1 (1 — апертурная диафрагма, 2 — фокальная плоскость), график aberrаций — на рис. 2 (а — с плоской ПИ; б — с криволинейной ПИ; $\lambda_{\text{син}} = 0,486$, $\lambda_{\text{зел}} = 0,588$, $\lambda_{\text{кр}} = 0,656$ мкм; S — синусоидальная форма, T — тангенциальная форма) и точечная диаграмма — на рис. 3.

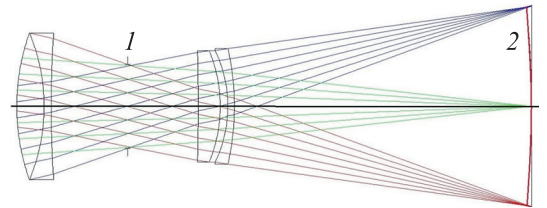


Рис. 1

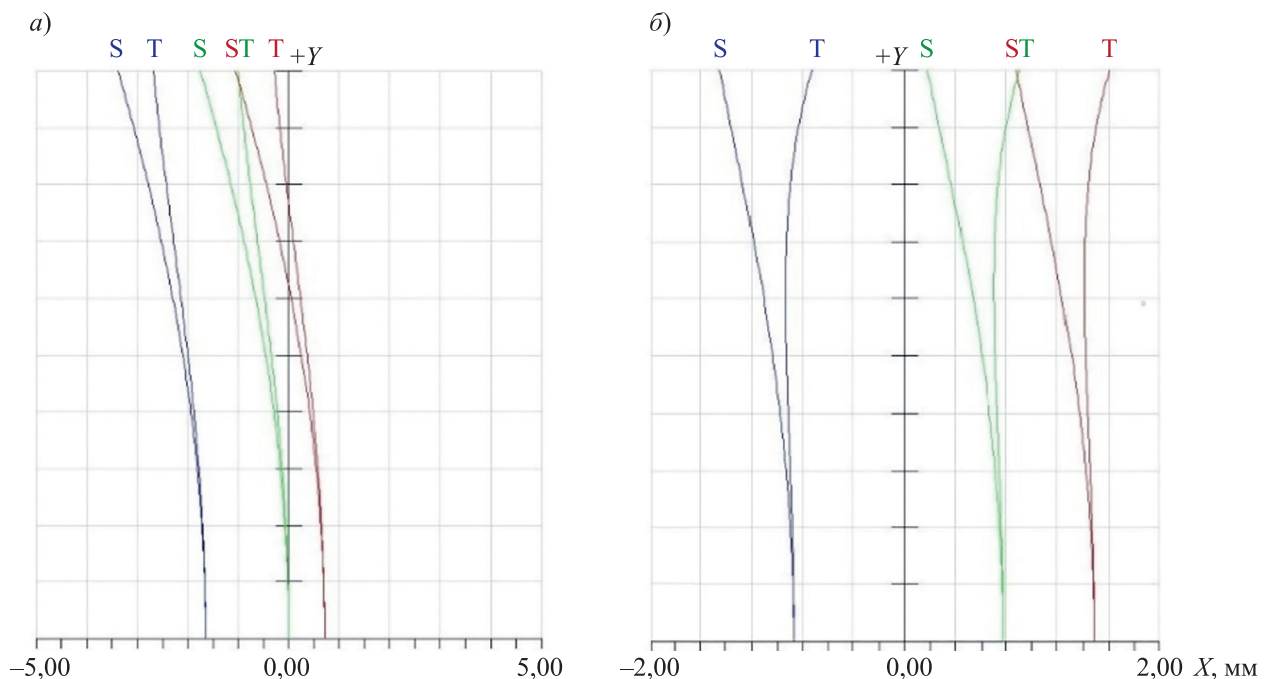


Рис. 2

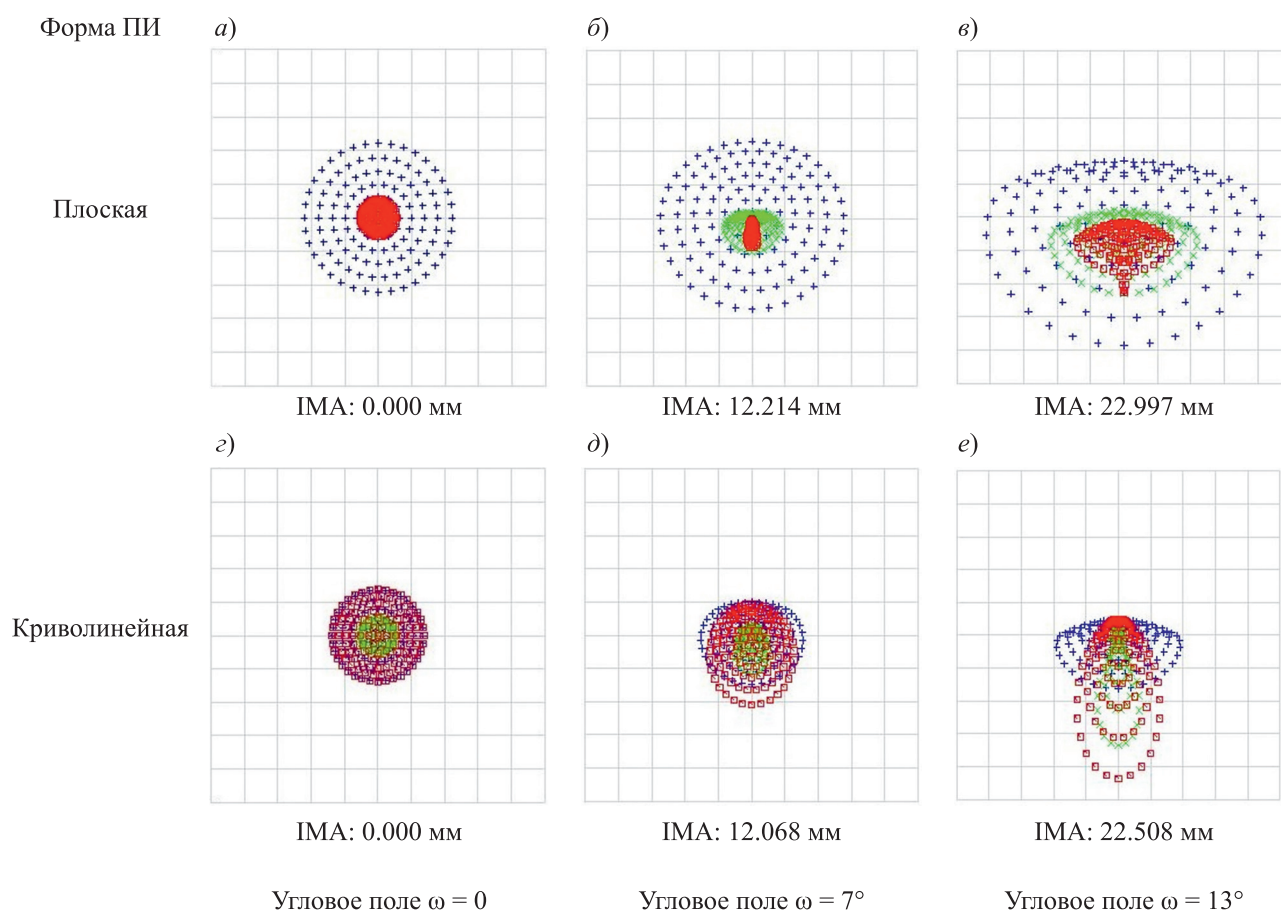


Рис. 3

Как видно из рис. 3, преимуществом использования приемника с криволинейной фоточувствительной поверхностью является лучшее качество регистрируемого изображения — размер пятна рассеяния осевой точки уменьшен до 0,3 мм; максимальный размер пятна рассеяния на краю поля ($\omega = 13^\circ$) уменьшен с 0,8 до 0,4 мм; отклонение от плоскости поверхности составляет $\Delta z = 1,8$ мм. В конструкции объектива с криволинейной фоточувствительной поверхностью приемника отсутствует линзовый компенсатор, это уменьшает его стоимость.

Отдельно отметим, что приведенные здесь результаты получены без использования оптимизации и изменения конструктивных параметров линз объектива.

Численное моделирование. Для подтверждения возможности разработки приемника с криволинейной фоточувствительной поверхностью нами выполнено численное моделирование.

При помощи аппроксимации находится функция $\varphi(x)$, которая приближенно равна исходной $f(x)$. При интерполяции требуется, чтобы приближение имело те же значения, что и у приближаемой функции:

$$\varphi(x_i) = f(x_i), i = 0, 1, 2, \dots, n.$$

Это условие называется условием интерполяции. Функция $\varphi(x)$, удовлетворяющая условиям интерполяции, называется интерполяционной, а точки $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ — узлами интерполяции [13].

При помощи инструмента Ray Trace программы Zemax находятся координаты основных точек криволинейной поверхности. По найденным точкам строится исходная функция $f(x)$, и на основе метода наименьших квадратов выполняется аппроксимация в среде Excel. Полученные результаты представлены на рис. 4 (1 — график исходной функции $f(x)$, 2 — аппроксимирующей $\varphi(x)$).

Полученная аппроксимирующая функция представлена полиномиальной зависимостью второго порядка, и ее уравнение можно записать в следующем виде:

$$\varphi(x_2) = -0,0461x^2 + 0,5536x + 114,59.$$

Точность аппроксимации определяется с учетом фактической глубины резкости объектива [14]:

$$T = a_2 - a_1 = 0,58 \text{ мм},$$

где a_1 — расстояние от входного зрачка до плоскости переднего плана, a_2 — расстояние от входного зрачка до плоскости заднего плана.

Радиус кривизны полученной криволинейной поверхности $R_{\text{Pet}} = 220$ мм.

Результаты численного моделирования найдут свое применение в проектировании технологии изготовления криволинейной фоточувствительной поверхности, а также при согласовании допустимых значений отклонений, которые проявляются в процессе разработки.

Оценка технологических возможностей изготовления приемника с криволинейной фоточувствительной поверхностью. При проектировании приемника с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы в первую очередь необходимо учитывать прочностные характеристики материала объекта. Материал и форма разрабатываемого объекта должны подбираться таким образом, чтобы при испытаниях, в процессе транспортировки и эксплуатации структура изделия сохраняла целостность.

Объектом исследования на прочность является приемник с фоточувствительной поверхностью криволинейной формы, представляющий собой тонкую пластину монокристаллического кремния (далее — полупроводниковый кристалл). Имитационное моделирование полупроводникового кремниевого кристалла размером 23×23 мм проводилось с помощью программного обеспечения SolidWorks и SolidWorks Simulation. Далее исследовалась прочность кристалла, параметром, по которому проводится оценка прочности, является предел прочности σ . Предел прочности* — механическое напряжение, при превышении которого происходит разрушение материала (монокристаллический кремний имеет высокий предел прочности [15]). На основе экспериментальной оценки прочности кремниевой матрицы при трехточечном изгибе [16] был выбран критерий прочности на разрыв при растяжении $\sigma_{\text{max}} = 385$ МПа (рис. 5).

В процессе исследования конструктивными параметрами являются толщина кристалла (50–110 мкм) и радиус кривизны поверхности (20–600 мм). Результаты исследования, проведенного с помощью программы SolidWorks Simulation, представлены на рис. 6 (δ — толщина кремниевого кристалла).

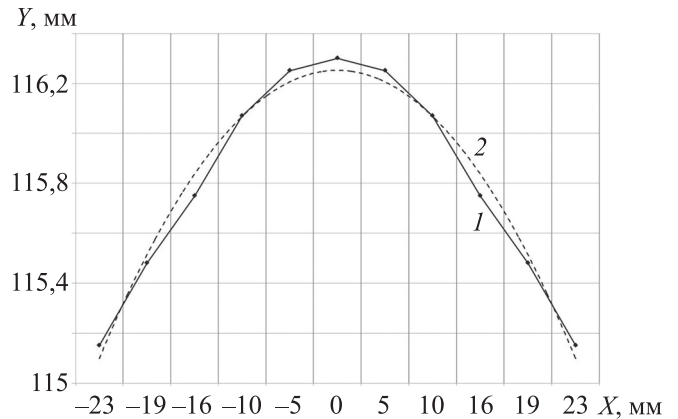


Рис. 4

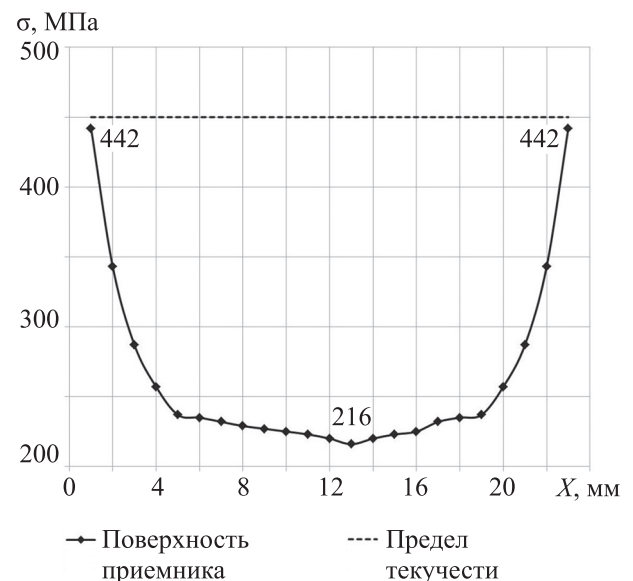


Рис. 5

* ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. М., 1997. 25 с.

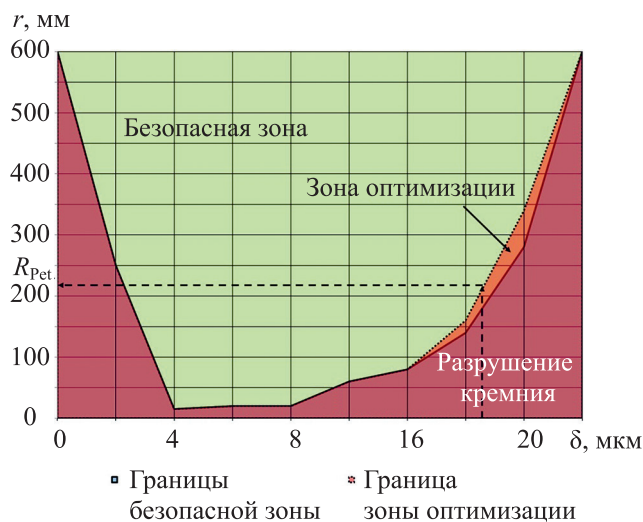


Рис. 6

С помощью проведенного исследования были определены: безопасная зона, в которой риск повреждения структуры кристалла при технологических операциях отсутствует ($\sigma_{Si} > \sigma_{max}$); зона оптимизации, где значения напряжений в кристаллической структуре близки к пределу прочности кремния ($\sigma_{Si} \geq \sigma_{max}$), конструктивные параметры в этой зоне требуют дополнительной оптимизации; зона, в которой происходит разрушение структуры кремния ($\sigma_{Si} < \sigma_{max}$). При рассчитанном в ходе моделирования радиусе кривизны фоточувствительной поверхности ($R_{Pet} = 220$ мм) максимально возможная толщина кристалла, которая удовлетворяет требованиям прочности, составляет около

93 мкм. При проектировании рекомендуется использовать меньшую толщину — в пределах безопасной зоны (50 мкм). В этом случае толщина подложки для кристалла при $\Delta z = 1,8$ мм равна 1,75 мм.

Исследование показало, что для рассматриваемого в статье объектива Петцваля рекомендуются габаритные размеры приемника излучения $23 \times 23 \times 0,05$ мм, радиус кривизны фоточувствительной поверхности — 220 мм.

Заключение. В работе выполнен расчет геометрических параметров приемника с криволинейной фоточувствительной поверхностью, согласованного с нормальным объективом. При постоянных конструктивных параметрах нормального объектива криволинейная поверхность приемника обеспечивает ряд преимуществ, в сравнении с плоской поверхностью. Во вновь разработанных объективах больше не требуется проектировать оптическую систему с компенсацией кривизны поля, роль компенсатора берет на себя фоточувствительная поверхность приемника. Это позволяет уменьшить габаритные характеристики оптической системы и всего приемного тракта.

Важным условием применения криволинейной фоточувствительной поверхности является технологическая возможность изготовления приемника подобной формы. Имитационное моделирование показало, что фоточувствительную поверхность приемника возможно представить в криволинейной форме. На прочностные характеристики приемного устройства влияют такие параметры, как радиус кривизны поверхности и толщина приемника.

Расчет криволинейной фоточувствительной поверхности приемника, согласованного с нормальным объективом, может быть полезен при проектировании оптических систем и приемных трактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chambion B., Gaschet C., Behaghel T., Vandeneynde A., Caplet S., Gétin S., Henry D., Hugot E., Jahn W., Lombardo S., Ferrari M. Curved sensors for compact high-resolution wide-field designs: prototype demonstration and optical characterization // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. 2018. Vol. 10539. P. 1053913.
2. Guenter B., Joshi N., Stoakley R., Keefe A., Geary K., Freeman R., Hundley J., Patterson P., Hammon D., Herrera G., Sherman E., Nowak A., Schubert R., Brewer P., Yang L., Mott R., McKnight G. Highly curved image sensors: a practical approach for improved optical performance // Optics Express. 2017. Vol. 25, N 12. P. 13010–13023. DOI: 10.1364/OE.25.013010.
3. Iwert O., Delabre B. The challenge of highly curved monolithic imaging detectors // High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV. 2010. Proc. SPIE. Vol. 7742, N 6. P. 646–654.
4. Swain P. K., Channin D. J., Taylor G. C., Lipp S. A., and Mark D. S. Curved CCDs and their application with astronomical telescopes and stereo panoramic cameras // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5301. P. 109–129.

5. Dumas D., Fendler M., Baier N., Primot J., le Coarer E. Curved focal plane detector array for wide field cameras // *Applied Optics*. 2012. Vol. 51, N 22. P. 5419–5424.
6. Itonaga K., Arimura T., Matsumoto K., Kondo G., Terahata K., Makimoto S., Hirayama T. A Novel Curved CMOS Image Sensor Integrated with Imaging System // *Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology)*. Digest of Technical Papers. 2014. DOI:10.1109/vlsit.2014.6894341.
7. Hugot E., Lombardo S., Behaghel Th., Chambion B., Jahn W., Gaschet Ch., Hugo S., Gach J. L., Ferrari M., Henry D. Curved sensors: experimental performance of CMOS prototypes and wide field related imagers // *Intern. Conf. on Space Optics (ICSO 2018)*. Chania, Greece, 9–12 October 2018. *Proc. of SPIE*. Vol. 11180. P. 111802Y-2.
8. Gaschet Ch., Chambion B., Gétin S., Moulin G. Curved sensors for compact high-resolution wide field designs // *Novel Optical Systems Design and Optimization XX*. 2017. *Proc. of SPIE*. Vol. 10376.
9. Olmedo M., Lloyd J., Mamajek E. E., Chávez M. Deep GALEX UV Survey of the Kepler Field I: Point Source Catalog // *The Astrophysical Journal*. 2015. Vol. 813, N 2.
10. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.
11. Русинов М. М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979. 488 с.
12. Sutton T. Panoramic Photography // *J. of the Photographic society*. 1860. N 95. 185 p.
13. Мальшиева Т. А. Численные методы и компьютерное моделирование. Лабораторный практикум по аппроксимации функций. СПб: Университет ИТМО, 2016. 33 с.
14. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1966. 565 с.
15. Адамова А. А., Цивинская Т. А. Прецизионный сенсор давления на базе монокристаллического кремния // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2020. № 9. С. 104–109.
16. Zhao J.-H., Tellkamp J., Gupta V., and Edwards D. R. Experimental Evaluations of the Strength of Silicon Die by 3-Point-Bend Versus Ball-on-Ring Tests // *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*. 2009. Vol. 32, N 4. P. 248–255.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Артём Михайлович Безуглый** — аспирант; Университет ИТМО, Центр прикладной оптики; E-mail: ambezuglyi@itmo.ru
- Алексей Валентинович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент, профессор; Университет ИТМО, Центр прикладной оптики; директор ЦПО; E-mail: bakholdin@itmo.ru
- Татьяна Вячеславовна Точилина** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, Центр прикладной оптики; старший преподаватель; E-mail: tvtochilina@itmo.ru

Поступила в редакцию 31.01.2024; одобрена после рецензирования 01.03.2024; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Chambion B., Gaschet C., Behaghel T., Vandeneynde A., Caplet S., Gétin S., Henry D., Hugot E., Jahn W., Lombardo S., Ferrari M. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, Conference Series, 2018, vol. 10539, pp. 1053913.
2. Guenter B., Joshi N., Stoakley R., Keefe A., Geary K., Freeman R., Hundley J., Patterson P., Hammon D., Herrera G., Sherman E., Nowak A., Schubert R., Brewer P., Yang L., Mott R., McKnight G. *Optics Express*, 2017, no. 12(25), pp. 13010–13023, DOI: 10.1364/OE.25.013010.
3. Iwert O., Delabre B. *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV*, 2010, *Proc. SPIE*. 7742, vol. 6, pp. 646–654.
4. Swain P. K., Channin D. J., Taylor G. C., Lipp S. A., and Mark D. S. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5301, pp. 109–129.
5. Dumas D., Fendler M., Baier N., Primot J., le Coarer E. *Applied Optics*, 2012, no. 22(51), pp. 5419–5424.
6. Itonaga K., Arimura T., Matsumoto K., Kondo G., Terahata K., Makimoto S., Hirayama T. *Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology)*. Digest of Technical Papers, 2014, DOI:10.1109/vlsit.2014.6894341.
7. Hugot E., Lombardo S., Behaghel Th., Chambion B., Jahn W., Gaschet Ch., Hugo S., Gach J. L., Ferrari M., Henry D. International Conference on Space (Optics—ICSO 2018), Chania, Greece, October 9–12, 2018, *Proc. of SPIE*, vol. 11180, pp. 111802Y-2.
8. Gaschet Ch., Chambion B., Gétin S., Moulin G. *Novel Optical Systems Design and Optimization XX*, *Proc. of SPIE*, 2017, vol. 10376.
9. Olmedo M., Lloyd J., Mamajek E. E., Chávez M. *The Astrophysical Journal*, 2015, no. 2(813).
10. Slyusarev G. G. *Raschet opticheskikh sistem* (Calculation of Optical Systems), Leningrad, 1975, 640 p. (in Russ.)
11. Rusinov M. M. *Technical optics* (Tekhnicheskaya optika), Leningrad, 1979, 488 p. (in Russ.)
12. Sutton T. *J. of the Photographic society*, 1860, no. 95, 185 p.

13. Malysheva T. A. *Chislennyye metody i komp'yuternoye modelirovaniye. Laboratornyy praktikum po approksimatsii funktsiy* (Numerical Methods and Computer Modeling. Laboratory Workshop on Approximation of Functions), St. Petersburg, 2016, 33 p. (in Russ.)
14. Churilovsky V. N. *Teoriya opticheskikh priborov* (Theory of Optical Instruments), Leningrad, 1966, 565 p. (in Russ.)
15. Adamova A. A., Tsivinskaya T. A. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2020, no. 9, pp. 104–109. (in Russ.)
16. Zhao J.-H., Tellkamp J., Gupta V., and Edwards D. R. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2009, no. 4(32), pp. 248–255.

DATA ON AUTHOR

Artyom M. Bezuglyi	—	MSc; ITMO University, Applied Optics Center; Post-Graduate Student; E-mail: ambezuglyi@itmo.ru
Aleksey V. Bakholdin	—	PhD, Associate Professor; ITMO University, Applied Optics Center; E-mail: bakholdin@itmo.ru
Tatiana V. Tochilina	—	PhD, Senior Lecturer; ITMO University, Applied Optics Center; E-mail: tvtochilina@itmo.ru

Received 31.01.2024; approved after reviewing 01.03.2024; accepted for publication 16.04.2024.