

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ФОТОПРИЕМНИКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ

С. С. БАЕВ<sup>1,2</sup>, В. В. КОРОТАЕВ<sup>1</sup>, В. Н. КУЗЬМИН<sup>2</sup>, К. А. ТОМСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Научно-техническое предприятие „ТКА“, 192289, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: ssbaev@ya.ru

Обсуждаются проблемы разработки спектрорадиометра в составе системы автоматического управления приборами для облучения растений, выращиваемых в условиях закрытого грунта. Спектрорадиометр предназначен для обеспечения оптимального режима облучения растений и должен обладать достаточной точностью и невысокой стоимостью. Рассмотрена погрешность спектрорадиометра, обусловленная дискретностью многоэлементного фотоприемника и отношением полуширины монохроматического изображения щели к шагу элементов. Представлены результаты эксперимента для серийно выпускаемых многоэлементных приемников оптического излучения с разной шириной чувствительных элементов при разной ширине монохроматического изображения входной щели полихроматора.

**Ключевые слова:** оптико-электронная система, полихроматор, многоэлементный фотоприемник, фотосинтетическая активная радиация, неисключенная погрешность

**Введение.** Для развития агропромышленного комплекса России, играющего значимую роль в экономике страны, целесообразно интенсивное внедрение в структуру его тепличного сектора интеллектуальных технологий, использующих последние достижения науки и техники.

Повышение эффективности выращивания продукции в условиях закрытого грунта является одной из актуальных задач сельского хозяйства, для выполнения которой необходимо решить проблему оптимизации режима облучения растений по энергетическим и спектральным параметрам (ГОСТ Р 57671-2017). Кроме того, весьма важным условием является оптимизация экономических параметров применяемого оборудования с учетом его стоимости и эксплуатационных затрат.

Применение управляемых светильников и контроль энергетических и спектральных параметров излучения позволяют обеспечить оптимизацию режима облучения [1—4] и максимально эффективно выращивать агрокультуры при недостатке естественного освещения. Параметры облучения зависят от вида растений, стадии их роста, времени суток и атмосферных условий. В агропромышленности искусственное облучение растений в условиях закрытого грунта [1, 5—10] осуществляется специальными установками, которые регулируются вручную либо с помощью программных или аппаратных средств. Однако урожайность растений ограничивается не только увеличением интенсивности участвующего в фотосинтезе потока излучения, но и другими факторами, поэтому излишняя облученность приведет не к повышению урожая, а только к излишней трате электроэнергии. При массовости продукции агропромышленного комплекса незначительная экономия энергии позволяет существенно повысить рентабельность предприятия. Для этого необходимо точно определять параметры облучения в теплице.

**Фотосинтетическая активная радиация.** Излучение, используемое растениями для фотосинтеза, называется фотосинтетической активной радиацией. По характеру действия на растение выделяют [6] следующие поддиапазоны излучения по длинам волн  $\lambda$ :

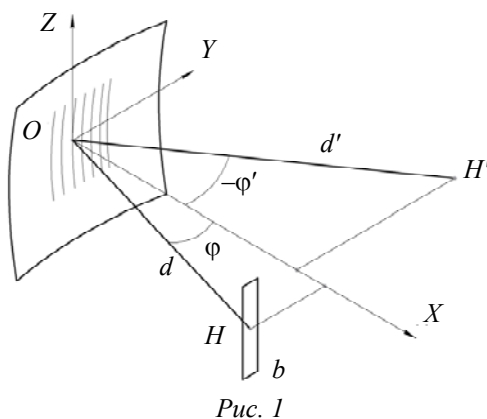
- излучение с  $\lambda = 400 \dots 500$  нм — имеет регуляторное и субстратное воздействие;
- излучение с  $\lambda = 500 \dots 600$  нм — не является абсолютно необходимым, но благодаря высокой проникающей способности излучение в этом диапазоне благоприятно влияет на фотосинтез оптически плотных листьев и густых посевов растений;
- излучение с  $\lambda = 600 \dots 700$  нм — оказывает субстратное и регуляторное воздействие; в составе общего излучения обеспечивает высокий фотосинтез, однако монохроматический (однородный) красный свет может приводить к аномальному росту и развитию растений, а в ряде случаев и к гибели некоторых их видов;
- излучение с  $\lambda = 700 \dots 750$  нм — обладает ярко выраженным регуляторным действием; рекомендуется небольшое количество в составе общего излучения.

При проектировании оптико-электронных систем для измерения фотосинтетической активной радиации в теплицах важную роль играет стоимость прибора. Одним из основных элементов прибора является приемник оптического излучения. Приборы с приемником оптического излучения, спектральная чувствительность которого скорректирована светофильтрами, имеют низкую стоимость, однако привести спектральную чувствительность прибора к идеальной этим способом затруднительно [5]. Спектрорадиометры имеют меньшую погрешность, обусловленную отклонением спектральной чувствительности от идеальной. Применение многоэлементных приемников оптического излучения (ПОИ) позволяет избежать использования движущихся частей, что повышает надежность и простоту конструкции. При выборе конструктивных элементов [11—19] необходимо учитывать, с одной стороны, их обязательное соответствие поставленным при измерениях задачам, а с другой — их стоимость.

Стоимость многоэлементных ПОИ существенно зависит от размера чувствительных элементов. Кроме того, требуемое спектральное разрешение также накладывает ограничения на шаг элементов — для корректной регистрации спектра шаг чувствительных элементов должен быть меньше ширины аппаратной функции спектрального прибора. Выбор оптимальных параметров многоэлементного ПОИ с необходимой и достаточной погрешностью измерений и минимальной стоимостью позволит повысить экономическую эффективность спроектированного прибора.

Задача представленного в настоящей статье исследования — определение оптимального шага элементов многоэлементного приемника оптического излучения для заданной ширины изображения входной щели при проектировании спектрорадиометра, предназначенного для измерения фотосинтетической активной радиации в теплицах.

**Моделирование полихроматора.** Рассмотрим полихроматор (рис. 1) с входной щелью  $H$  шириной  $b$  и вогнутой решеткой радиусом  $r$  с центром в точке  $O$ . Углы  $\varphi$  и  $\varphi'$  — углы падения и дифракции;  $d = AO$  и  $d' = OA'$  — расстояния от входной щели и плоскости изображения до вершины решетки. Плоскости  $XOY$  и  $XOZ$  являются плоскостями симметрии поверхности решетки.



Направления главных максимумов интерференции пучков, дифрагированных на малом участке вогнутой решетки, определяются той же формулой, что и для плоской отрагательной решетки [13, 20, 21]:

$$\sin \varphi + \sin \varphi' = k\lambda N,$$

где  $k$  — порядок дифракции,  $N$  — число штрихов на единицу длины; величину  $N$  можно выразить через расстояние  $e$  между соседними штрихами:

$$N = 1/e.$$

Характеристическая функция (функция оптического пути) по степеням  $x$  и  $z$  определяется как [13, 21—23]

$$V(x, y) = -k\lambda m(y, z) + y(\sin \varphi + \sin \varphi') + \frac{y^2}{2} \left( \frac{\cos^2 \varphi}{d} + \frac{\cos^2 \varphi'}{d'} - \frac{\cos \varphi - \cos \varphi'}{r} \right) + \frac{z^2}{2} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{d'} - \frac{\cos \varphi + \cos \varphi'}{\bar{r}} \right),$$

где  $r$  и  $\bar{r}$  — радиусы кривизны поверхности решетки в вертикальном и горизонтальном сечениях; в рассматриваемом случае решетка сферическая и  $r = \bar{r}$ ; параметр  $m(y, z)$  определяет количество штрихов между точкой падения лучей на поверхность решетки и ее вершиной.

На рис. 2, а показан способ фокусировки изображения щели на „круге Роуланда“ — окружности с центром в точке  $C'$ , на которой находятся вершина решетки, щель и ее монохроматические изображения [13].

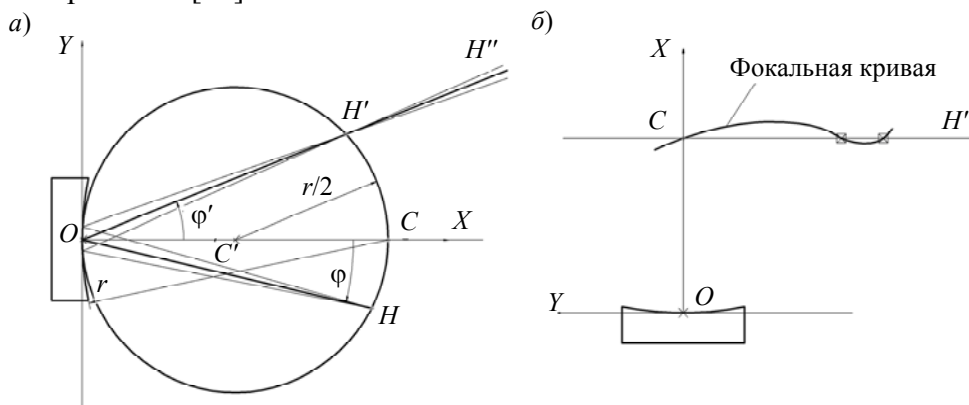


Рис. 2

В случае применения решетки с переменным шагом расстояние  $e$  изменяется по линейному закону:

$$e(y) = e_0(1 + \mu y),$$

где  $e_0$  — расстояние между соседними штрихами у вершины решетки,  $\mu$  — некоторая константа.

Тогда

$$V(y, z) = \frac{y^2}{2} \left( \frac{\cos^2 \varphi}{d} + \frac{\cos^2 \varphi'}{d'} - \frac{\cos \varphi + \cos \varphi'}{r} + \frac{k\lambda}{e_0} \mu \right) + \frac{z^2}{2} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{d'} - \frac{\cos \varphi + \cos \varphi'}{r} \right)$$

и уравнение фокальной кривой в полярных координатах  $d'$  и  $\varphi'$  принимает вид

$$d'(\varphi') = \frac{r \cos^2 \varphi'}{\cos \varphi' - \sin \varphi'_0 \cos \varphi'_0 \sin \varphi'}.$$

Плоскость изображения может пересекать фокальную кривую в одной точке, в двух точках либо не пересекать вовсе (рис. 2, б). В точках пересечения при соответствующих длинах волн изображение сфокусировано.

Монохроматическое изображение щели в реальной оптической системе можно смоделировать методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) [23] либо методом Гюйгенса — Френеля в программе Zemax для проектирования и анализа оптических систем. Метод Гюйгенса — Френеля, в отличие от метода БПФ, более точен.

Смоделируем оптическую схему полихроматора (рис. 3). Для примера выберем серийно производимую дифракционную решетку с плотностью штрихов в вершине  $180 \text{ мм}^{-1}$ , радиусом  $125 \text{ мм}$ , шириной заштрихованной области  $30 \text{ мм}$ , константой  $\mu = 0,00282$ . При  $\varphi = 2,0^\circ$ ,  $d = 141,0 \text{ мм}$  и  $\lambda = 380 \dots 760 \text{ нм}$  фокальная кривая имеет малое отклонение от плоскости, параллельной плоскости щели. Этим обстоятельством обусловлен выбор радиуса и плотности штрихов решетки.

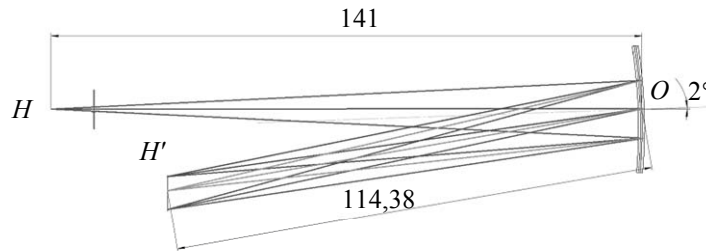


Рис. 3

Спектральный диапазон выбран исходя из диапазона длин волн фотосинтетической активной радиации [1, 6—8].

Распределение облученности  $D(y)$  монохроматического изображения щели при  $z = 0$  в системе, свободной от aberrаций, в случае широких щелей определяется прямоугольником [13] шириной

$$b' = \frac{b\Gamma f_2}{f_1 \cos \sigma},$$

где  $b$  — ширина входной щели,  $\Gamma$  — меридиональное увеличение диспергирующей системы (в данном случае  $\Gamma = 1,007$ ),  $f_1$  — фокусное расстояние коллиматора,  $f_2$  — фокусное расстояние объектива,  $\sigma$  — угол наклона поверхности изображения.

В рассматриваемом случае роль коллиматора и объектива выполняет вогнутая поверхность дифракционной решетки, и за фокусные расстояния принимаются  $d$  и  $d'$  соответственно. График функции  $D(y)$  исследуемого полихроматора, соотношенный с функцией рассеяния PSF( $y$ ) точки бесконечно узкой щели, представлен на рис. 4, а.

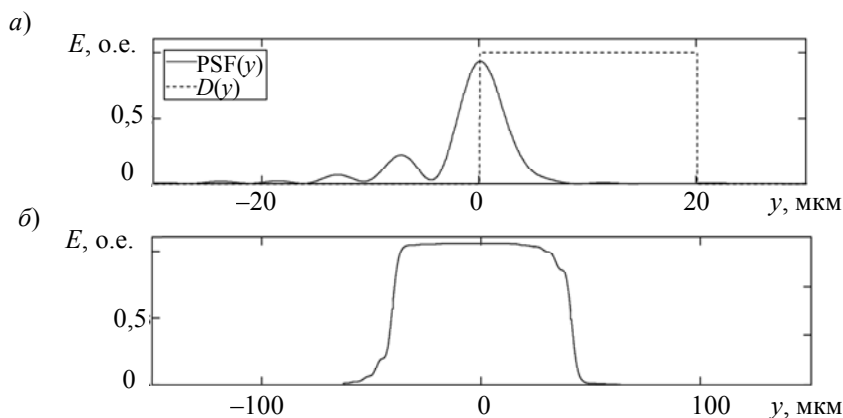


Рис. 4

Аппаратная функция полихроматора определяется операцией свертки (рис. 4, б):

$$A(y) = (\text{PSF} * D)(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{PSF}(xy')D(y - y')dy'.$$

В данном исследовании численное интегрирование проводилось в среде Mathcad.

В частном случае полихроматора с многоэлементным приемником оптического излучения пределы интегрирования ограничены полной шириной фотоприемника.

Сигнал, формируемый каждым элементом фотоприемника, описывается выражением

$$S(y) = (A * R)(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(y')R(y - y')dy',$$

где  $R(x)$  — прямоугольная функция с шагом  $s$ , ширина которой равна ширине  $w$  чувствительной площадки одного элемента фотоприемника (рис. 5; в данном случае  $w = 55$  мкм,  $s = 63,5$  мкм).

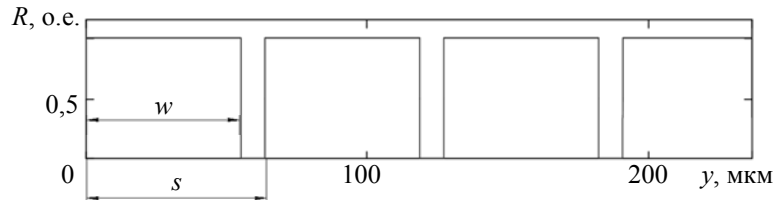


Рис. 5

Распределение сигналов по чувствительным элементам фотоприемника для монохроматического изображения щели определяется как

$$S(n) = \int_0^y A(y')R(y - ns)dy,$$

где  $n$  — номер чувствительного элемента фотоприемника.

Необходимо отметить, что шаг  $s$  между соседними элементами не равен ширине  $w$  чувствительной площадки элемента (см. рис. 5). Можно ввести коэффициент  $K_{\text{fill}} = w/s$ , показывающий насколько эффективно используется пространство между элементами (коэффициент „заполнения“).

При разных значениях  $w$  и  $s$  (и соответственно  $K_{\text{fill}}$ ) результирующие распределения сигналов по элементам будут различными.

В современных многоэлементных ПОИ расстояние между соседними элементами мало, произведение этого расстояния на линейную дисперсию составляет порядка долей или единиц нанометров. В моделируемом полихроматоре длины волн излучения, приходящего на два соседних чувствительных элемента, различаются несущественно ( $\Delta\lambda \approx 3$  нм). Так, для кремниевое ПОИ разница спектральной чувствительности при  $\lambda$ , равном 550 и 553 нм, очень незначительна, и изменением спектральной чувствительности ПОИ можно пренебречь.

Монохроматические изображения щели с положением максимума облученности в центре чувствительного элемента, например 4-го ( $n_{\text{max}}=4$ ), и в центре нечувствительной области, например между 3-м и 4-м элементами ( $n_{\text{max}}=3,5$ ), формируют разные сигналы на одном и том же элементе. При этом разность сигналов определяется как (рис. 6)

$$\Delta S = \int_0^y A(y')R(y - ns)dy - \int_0^y A\left(y' - \frac{s}{2}\right)R(y - ns)dy,$$

а относительная разность выходных сигналов — как

$$\Delta S' = 1 - \frac{\int_0^y A\left(y' - \frac{s}{2}\right)R(y - ns)dy}{\int_0^y A(y')R(y - ns)dy}.$$

Результаты расчета  $\Delta S'$  для разных значений шага  $s$  и ширины  $b'$  монохроматического изображения щели в геометрическом приближении представлены на рис. 7. Отношение  $b'/s$

принято в качестве оси абсцисс для наглядности представления данных. Значения  $s = 63,5$  мкм и  $s = 7,8$  мкм (рис. 7, а, б соответственно) выбраны для моделирования выходных сигналов серийных многоэлементных ПОИ AMS TSL1401 [24] и Hamamatsu S9226-04 [25] при использовании их в моделируемом полихроматоре. Выбор этих ПОИ обусловлен тем, что они имеют разный размер чувствительных элементов, что позволяет провести более полное исследование для разных параметров ПОИ.

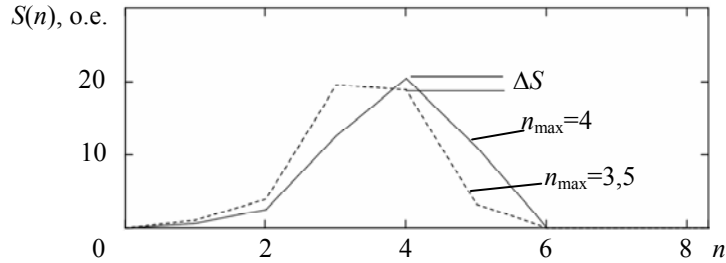


Рис. 6

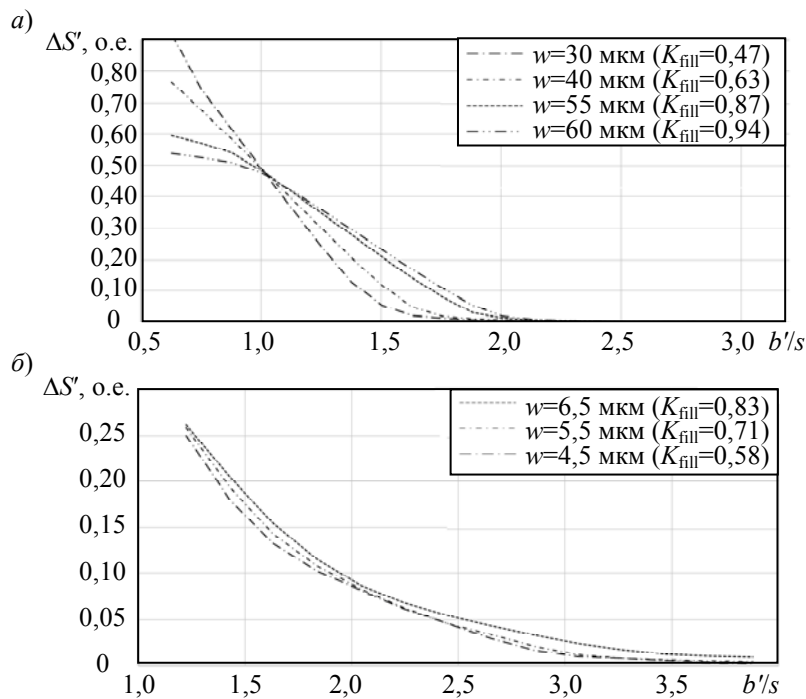


Рис. 7

Анализ рис. 7 показывает, что при одинаковых соотношениях  $b'/s$  расчетные значения  $\Delta S'$  сильно различаются. В данном случае при большой ширине щели распределение облученности изображения (см. рис. 4, б) значительно отличается по форме от распределения облученности при малой ширине щели (порядка 20 мкм). Щели меньшей ширины в серийных спектрометрических приборах практически не используются, поэтому в данном исследовании не рассматриваются.

**Результаты.** По результатам моделирования (см. рис. 7) можно сделать вывод, что для отношения  $b'/s = 3$  (при условии, что значение  $b'$  существенно превышает полуширину функции рассеяния точки полихроматора), описанная выше погрешность практически нивелируется ( $\Delta S' < 0,1\%$ ). Для малых щелей вносимая погрешность составляет менее 5 %, а „рекомендуемое“ значение  $b'/s$  — не менее 4. При этом коэффициент  $K_{\text{fill}}$  оказывает влияние на вносимую погрешность только при условии, что аппаратная функция приближается к П-образной; в случае сильно искаженной аппаратной функции и при малых щелях вносимая погрешность составляет не более 3 %.

**Экспериментальное исследование.** Для экспериментального подтверждения теоретических предположений был разработан полихроматор в соответствии с моделируемой схемой (см. рис. 3). Входная щель полихроматора освещалась монохроматическим излучением на выходе монохроматора МДР-23 [26]. Источником света служила галогенная лампа накаливания. Для устранения влияния вторых порядков на входе монохроматора МДР-23 установлен светофильтр с областью длин волн  $\lambda=350\dots 600$  нм. Исследования проводились для диапазона  $\lambda=530\dots 570$  нм. Сканирование спектра для ПОИ AMS TSL1401 осуществлялось с шагом 0,2 нм, для Hamamatsu S9226-04 — с шагом 0,1 нм.

Результаты измерений выходного сигнала указанных ПОИ графически представлены на рис. 8.

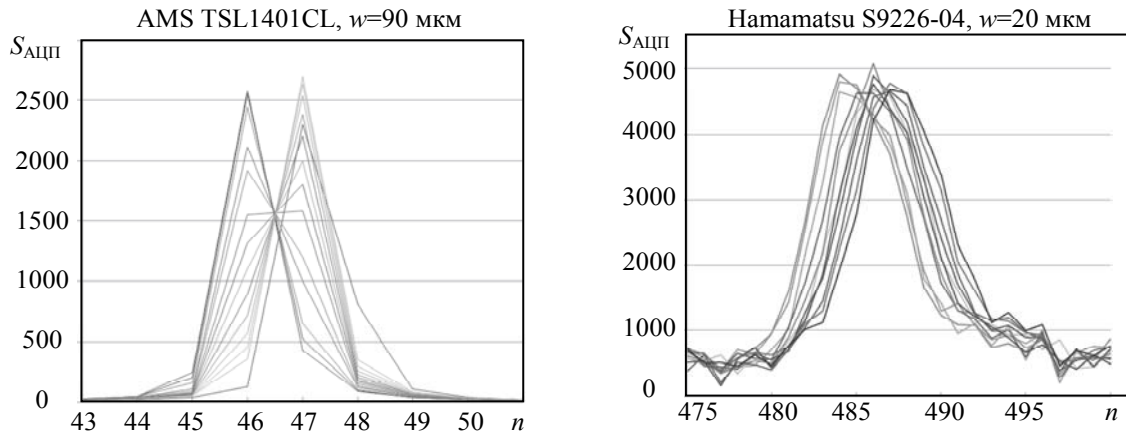


Рис. 8

Параметры ПОИ AM9 TSL1401CL:  $w = 55$  мкм,  $s = 63,5$  мкм,  $K_{\text{fill}} = 0,866$ . Рис. 9 демонстрирует сравнение экспериментальных результатов с расчетными, точки „♦“ показаны результаты измерений: а — AMS TSL1401CL при ширине входной щели  $b=90$  мкм (точка 1) и  $b=250$  мкм (точка 2); б — Hamamatsu S9226-04 при  $b=20$  мкм (точка 3). Измеренные значения  $\Delta S'$ , полученные при сканировании спектра, совпадают с теоретическими в пределах погрешности, вносимой неравномерностью чувствительности элементов ПОИ (photo response non uniformity).

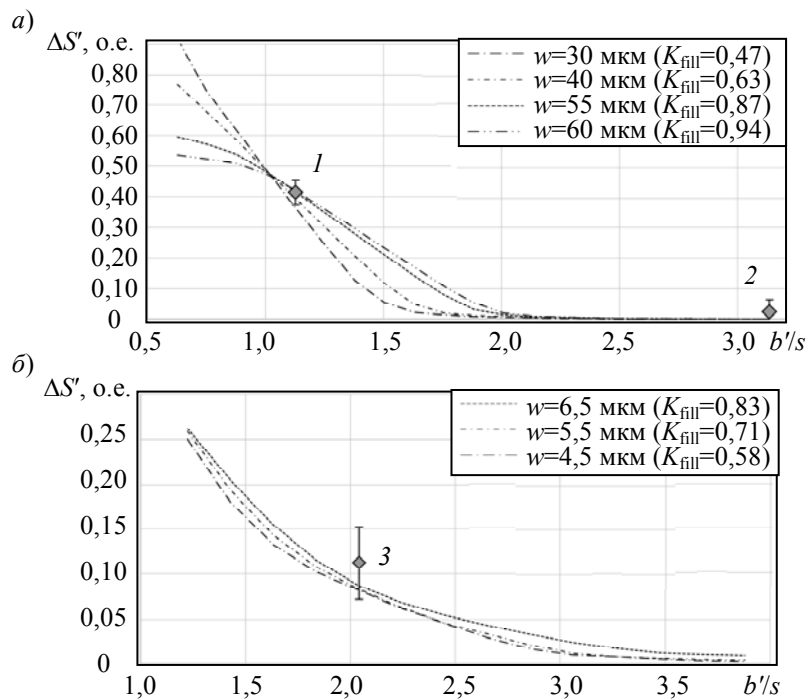


Рис. 9

**Заключение.** В результате теоретических и экспериментальных исследований:

— определена погрешность спектрорадиометра, обусловленная соотношением ширины аппаратной функции полихроматора к ширине чувствительных элементов приемника оптического излучения относительно шага между ними;

— предложен критерий выбора многоэлементного приемника оптического излучения — отношение полуширины монохроматического изображения щели к шагу элементов должно быть не менее трех, что позволяет минимизировать погрешность спектрорадиометра;

— показано, что коэффициент „заполнения“ элементов оказывает различное влияние на величину вносимой погрешности;

— экспериментально подтверждены теоретические расчеты на примере полихроматора с многоэлементным приемником оптического излучения.

Результаты представленного исследования могут быть использованы при проектировании спектральных оптико-электронных приборов для измерения фотосинтетической активной радиации при заданных требованиях к точности измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CIE Publication 106/7: Terminology for Photosynthetically Active Radiation for Plants. 1993.
2. ANSI/ASABE S640. Quantities and Units of Electromagnetic Radiation for Plants (Photosynthetic Organisms). American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017.
3. Aitkenhead M., Gaskin G., Lafouge N., Hawes C. PHYLIS: A low-cost portable visible range spectrometer for soil and plants // *Sensors*. 2017. Vol. 17, N 1. DOI: 10.3390/s17010099.
4. Hutengs C., Ludwig B., Jung A., Eisele A., Vohland M. Comparison of portable and bench-top spectrometers for mid-infrared diffuse reflectance measurements of soils // *Sensors*. 2018. Vol. 18, N 4. DOI: 10.3390/s18040993.
5. Pirson A., Zimmermann M. Encyclopedia of Plant Physiology. Physiological Plant Ecology I. Responses to the Physical Environment. Springer, 1981. 630 p.
6. Айзенберг Ю. Б. Справочная книга по светотехнике. М.: Изд-во „Знак“, 2006. 972 с.
7. Taiz L., Zeiger E. Plant Physiology. Sunderland: Sinauer Associates Inc. Publ., 2006. 705 p.
8. Алехина Н. Д., Балнокин Ю. В., Гавриленко В. Ф. и др. Физиология растений / Под ред. И. П. Ермакова и др. М.: Академия, 2005. 640 с.
9. Gueymard C. Interdisciplinary applications of a versatile spectral solar irradiance model: A review // *Energy*. 2005. Vol. 30. P. 1551—1576. DOI: 10.1016/j.energy.2004.04.032.
10. Randall W., Lopez R. Comparison of supplemental lighting from high-pressure sodium lamps and light-emitting diodes during bedding plant seedling production // *Hortscience*. 2014. Vol. 49, N 5. P. 589—595.
11. Tkachenko N. Optical Spectroscopy. Methods and Instrumentations. London: Elsevier Science, 2006.
12. Pajares G. Advances in sensors applied to agriculture and forestry // *Sensors*. 2011. Vol. 11, N 9. P. 8930—8932. DOI: 10.3390/s110908930.
13. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
14. Тарасов К. И. Спектральные приборы. Л.: Машиностроение, 1968. 388 с.
15. Pacheco-Labrador J., Martín M.P. Characterization of a field spectroradiometer for unattended vegetation monitoring. Key sensor models and impacts on reflectance // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 4154—4175. DOI: 10.3390/s150204154.
16. Pacheco-Labrador J., Ferrero A., Martín M. P. Characterizing integration time and gray-level-related nonlinearities in a NMOS sensor // *Appl. Optics*. 2014. Vol. 53, N 32. P. 7778—7786. DOI: 10.1364/AO.53.007778.
17. Wang X. R., Zhang J. Q., Feng Z. X., Chang H. H. Relationship between microscanned image quality and fill factor of detectors // *Appl. Optics*. 2005. Vol. 44, N 21. DOI: 10.1364/AO.44.004470.



18. Scheeline A. How to design a spectrometer // Appl. Spectroscopy. 2017. Vol. 71, N 10. P. 2237—2252. DOI: 10.1177/0003702817720468.
19. Тарасов В. В., Якушенко Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Логос, 2007. 192 с.
20. Namioka T. Theory of the concave grating I // J. Optical Society Amer. 1959. Vol. 49, No. 5.
21. Loewen E. Diffraction Grating Handbook. N. Y.: Newport Corporation, 2005.
22. Namioka T. Theory of the concave grating III. Seya-Namioka Monochromator // J. Optical Society Amer. 1959. Vol. 49, No. 10.
23. Katayama T., Takahashi A. Optical transfer function of concave grating spectrometer based on wave optical method // Japanese Journal of Appl. Physics. 1970. Vol. 9, N 12.
24. AMS TSL1401CL CMOS Linear Sensor Array. General Description [Электронный ресурс]: <<http://ams.com/eng/content/download/250163/975677/142515>>.
25. Hamamatsu S9226-04 CMOS Linear Image Sensor. General Description [Электронный ресурс]: <[http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s9226\\_series\\_kmpd1121e.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s9226_series_kmpd1121e.pdf)>.
26. Монохроматор МДР-23. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Л.: ЛОМО, 1989.

**Сведения об авторах**

- Сергей Сергеевич Баев** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; НТП „ТКА“; инженер; E-mail: ssbaev@ya.ru
- Валерий Викторович Коротаев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; заведующий кафедрой; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Владимир Николаевич Кузьмин** — д-р техн. наук, профессор; НТП „ТКА“; заместитель генерального директора по оптике и фотометрии; E-mail: kvnlight@mail.ru
- Константин Абрамович Томский** — д-р техн. наук, профессор; НТП „ТКА“; генеральный директор; E-mail: tka46@mail.ru

Поступила в редакцию  
20.08.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Баев С. С., Коротаев В. В., Кузьмин В. Н., Томский К. А. Оптимизация выбора многоэлементного фотоприемника при проектировании спектро радиометра для измерения фотосинтетической активной радиации // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 9. С. 761—770.

**THE OPTIMAL CHOICE OF MULTIELEMENT PHOTODETECTOR  
WHEN DESIGNING SPECTRORADIOMETER FOR MEASUREMENT  
OF PHOTOSYNTHETIC ACTIVE RADIATION**

**S. S. Baev<sup>1,2</sup>, V. V. Korotaev<sup>1</sup>, V. N. Kuzmin<sup>2</sup>, K. A. Tomsky<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> TKA Scientific Instruments, 192289, St. Petersburg, Russia

E-mail: ssbaev@ya.ru

The problems of developing a spectroradiometer to be included into a system of automated control over devices for irradiating plants grown under conditions of a closed ground are discussed. The spectroradiometer is designed to provide the optimal irradiation regime for plants and must be accurate enough and have low cost. The error of the spectroradiometer due to the discrete nature of the multielement photodetector and the ratio of the half-width of the monochromatic image of the spectroradiometer slit to the distance between the detector elements is considered. The results of an experiment performed with commercially available multielement optical detectors with different size of sensitive elements for various widths of monochromatic image of the polychromator input slit are presented.

**Keywords:** optical-electronic system, polychromator, multielement photodetector, non-excluded error

## REFERENCES

1. CIE Publication 106/7: Terminology for Photosynthetically Active Radiation for Plants, 1993.
2. ANSI/ASABE S640. Quantities and Units of Electromagnetic Radiation for Plants (Photosynthetic Organisms), American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017.
3. Aitkenhead M., Gaskin G., Lafouge N., Hawes C. *Sensors*, 2017, no. 1(17). DOI: 10.3390/s17010099.
4. Hutengs C., Ludwig B., Jung A., Eisele A., Vohland M. *Sensors*, 2018, no. 4(18). DOI: 10.3390/s18040993.
5. Pirson A., Zimmermann M. *Encyclopedia of Plant Physiology. Physiological Plant Ecology I. Responses to the Physical Environment*, Springer, 1981, 630 p.
6. Ayzenberg Yu.B. *Spravochnaya kniga po svetotekhnike* (Reference Book on Lighting Engineering), Moscow, 2006, 972 p. (in Russ.)
7. Taiz L., Zeiger E. *Plant physiology*, Sunderland, Sinauer Associates Inc. Publ., 2006, 705 p.
8. Alekhina N.D., Balnokin Yu.V., Gavrilenko V.F. et al. *Fiziologiya rasteniy* (Plant Physiology), Moscow, 2005, 640 p. (in Russ.)
9. Gueymard C. *Energy*, 2005, no. 30, pp. 1551–1576. DOI: 10.1016/j.energy.2004.04.032.
10. Randall W., Lopez R. *Hortscience*, 2014, no. 5(49), pp. 589–595.
11. Tkachenko N. *Optical Spectroscopy. Methods and Instrumentations*, London, Elsevier Science, 2006.
12. Pajares G. *Sensors*, 2011, no. 9(11), pp. 8930–8932. DOI: 10.3390/s110908930
13. Peysakhson I.V. *Optika spektral'nykh priborov* (Optics of Spectral Devices), Leningrad, 1975, 312 p. (in Russ.)
14. Tarasov K.I. *Spektral'nyye pribory* (Spectral Device), Leningrad, 1968, 388 p. (in Russ.)
15. Pacheco-Labrador J., Martín M.P. *Sensors*, 2015, no. 15, pp. 4154–4175. DOI: 10.3390/s150204154.
16. Pacheco-Labrador J., Ferrero A., Martín M.P. *Appl. Optics*, 2014, no. 32(53), pp. 7778–7786. DOI: 10.1364/AO.53.007778.
17. Wang X.R., Zhang J.Q., Feng Z.X., Chang H.H. *Appl. Optics*, 2005, no. 21(44). DOI: 10.1364/AO.44.004470.
18. Scheeline A. *Appl. Spectroscopy*, 2017, no. 10(71), pp. 2237–2252. DOI: 10.1177/0003702817720468.
19. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Dvukh- i mnogodiapazonnyye optiko-elektronnyye sistemy s matrichnymi priyemnikami izlucheniya* (Two-and Multi-Band Optoelectronic Systems with Matrix Radiation Receivers), Moscow, 2007, 192 p. (in Russ.)
20. Namioka T. *J. Optical Society Amer.*, 1959, no. 5(49).
21. Loewen E. *Diffraction grating handbook*, NY, Newport Corporation, 2005.
22. Namioka T. *J. Optical Society Amer.*, 1959, no. 10(49).
23. Katayama T., Takahashi A. *Japanese Journal of Appl. Physics*, 1970, no. 12(9).
24. AMS TSL1401CL CMOS Linear Sensor Array, General Description, <http://ams.com/eng/content/download/250163/975677/142515>.
25. Hamamatsu S9226-04 CMOS linear image sensor, General Description, [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s9226\\_series\\_kmpd1121e.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s9226_series_kmpd1121e.pdf).
26. *Monokhromator MDR-23. Tekhnicheskoye opisaniye i instruksiya po ekspluatatsii* (Monochromator MDR-23. Technical Description and Operating Instructions), Leningrad, 1989. (in Russ.)

## Data on authors

<b>Sergey S. Baev</b>	— Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; TKA Scientific Instruments, Engineer; E-mail: ssbaev@ya.ru
<b>Valery V. Korotaev</b>	— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Head of the Department; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
<b>Vladimir N. Kuzmin</b>	— Dr. Sci., Professor; TKA Scientific Instruments, Department of Optics and Photometry; Deputy Director for Optics and Photometry; E-mail: kvnlight@mail.ru
<b>Konstantin A. Tomsky</b>	— Dr. Sci., Professor; TKA Scientific Instruments; Director General; E-mail: tka46@mail.ru

**For citation:** Baev S. S., Korotaev V. V., Kuzmin V. N., Tomsky K. A. The optimal choice of multielement photodetector when designing spectroradiometer for measurement of photosynthetic active radiation. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 9. P. 761–770 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-9-761-770