

УДК 531.711:621.397

ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННОГО РАЗОГРЕВА ФОТОПРИЕМНОЙ КМОП-МАТРИЦЫ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2014 В.А. Сергеев^{1,2}, А.В. Беринцев³, С.Г. Новиков³, А.А. Черторийский^{1,2}

¹ Ульяновский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

² Ульяновский государственный технический университет

³ Ульяновский государственный университет

Поступила в редакцию 24.11.2014

Описан принцип действия и структурная схема установки для измерения параметров спектра узкополосного оптического излучения с помощью фотоприемной КМОП-матрицы. Экспериментально исследован эффект смещения изображения спектра светодиода в результате собственного разогрева КМОП-матрицы при ее работе в составе установки в различных режимах экспозиции излучения и считывания данных. Полученные результаты объясняются в рамках модели неравномерного теплового расширения кристалла фотоприемной матрицы из-за его неоднородного нагрева при считывания кадров.

Ключевые слова: *фотоприемная КМОП-матрица, спектр светодиода, смещение изображения, саморазогрев фотоприемника, тепловое расширение кристалла*

В связи с широким применением источников узкополосного оптического излучения (лазеров и светодиодов) в контрольно-измерительных и телекоммуникационных системах и повышением требований к стабильности характеристик этих источников актуальной задачей является разработка быстродействующих и точных средств измерения параметров спектра оптического излучения [1-5]. Для точного измерения параметров спектра излучения лазеров и светодиодов (СИД) используются спектроанализаторы, монохроматоры, полихроматоры и другие приборы с дисперсионными элементами. В качестве регистрирующих фотоприемных устройств в таких приборах применяются многоэлементные фотоприемники: фотодиодные или ПЗС линейки, ПЗС матрицы и др. [2-6]. В последние годы активно разрабатываются оптоэлектронные измерительные приборы, в состав которых входят фотоприемные устройства на основе КМОП-матриц, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с ПЗС-матрицами [7-9]. При проведении спектрометрических исследований КМОП-матрицу размещают в выходной фокальной плоскости спектрометра, и на фоточувствительную область КМОП-матрицы проецируется

спектр поступающего на вход спектрометра излучения. Использование различных режимов считывания информации с пикселей КМОП-матрицы и специальных алгоритмов обработки массивов данных (например, построчного усреднения) позволяет повысить точность измерения параметров спектра оптических сигналов. При этом необходимо учитывать большое число факторов, влияющих на погрешность определения параметров спектра по сигналам многоэлементного фотоприемника: разброс спектральной чувствительности и собственные электрические шумы фотоприемных ячеек (пикселей), время экспонирования излучения, изменение температуры матрицы в процессе измерения, механические колебания элементов конструкции установки, изменение параметров среды между источником и приемником и др. Влияние шумов фотоприемных ячеек ПЗС линеек на погрешность определения параметров спектра узкополосных оптических сигналов брэгговских датчиков рассматривалась в ряде работ [4, 5]. В [6] исследовано влияние на точность измерения координат изображения на ПЗС матрице термодформации конструкции матрицы в результате ее саморазогрева после включения. Установлена высокая изотропность деформаций матрицы в процессе саморазогрева.

Цель работы: провести экспериментальную оценку влияния на погрешность определения параметров спектра узкополосных оптических сигналов собственного разогрева КМОП-матрицы в процессе измерения.

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, доцент, директор. E-mail: sva@ulstu.ru

Беринцев Алексей Валентинович, инженер. E-mail: berints@mail.ru

Новиков Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории. E-mail: novikovsg@ulsu.ru

Черторийский Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией. E-mail: a-tchertor@yandex.ru

Для исследований была создана экспериментальная установка на базе спектрофотометра СФ-46, структурная схема которой показана на рис. 1. Вместо выходной щели спектрофотометра установлена оптическая система, обеспечивающая проецирование изображения спектра входного излучения на фоточувствительную область исследуемого многоэлементного фотоприемного устройства на основе КМОП-матрицы True 2.0 Mega Pixels CMOS Sensor цифровой камеры Cubeternet GL-UPC822 UVC с чувствительным элементом формата 1/6" и размерами кристалла 2,4x1,8 мм. Выбор матрицы обусловлен тем, что она установлена непосредственно на печатной плате без теплоотвода. Интерфейс управления позволяет изменять время экспозиции $\tau_э$ и длительность паузы $\tau_п$ между опросами фотоприемника в широком диапазоне.

Особенностью теплового режима работы КМОП-матриц является то, что в режиме паузы между опросами фотоприемника и в режиме экспозиции КМОП-матрица электрическую мощность практически не потребляет, и тепло в ее кристалле не выделяется, при считывании кадра активные в течение времени $\tau_к$ элементы КМОП-матрицы потребляют электрическую мощность, величина которой P_m определяется тактовой частотой считывания информации.

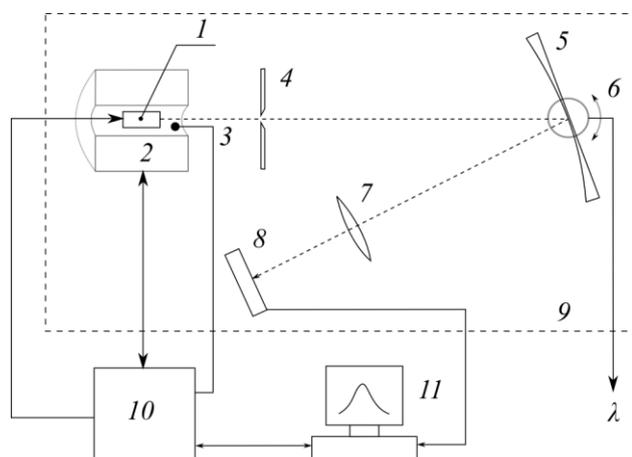


Рис. 1. Структурная схема установки для измерения спектра узкополосного оптического излучения

Измерительная установка состоит из источника излучения – СИД 1, помещенного внутрь термостата 2 и подключенного к блоку управления 10. Блок управления по командам с персонального компьютера 11 задает ток или напряжение на СИД и поддерживает постоянной температуру рабочей области. Температура корпуса СИД измеряется с помощью термопары 3. Излучение СИД через прозрачное окно термостата поступает на входную щель спектрофотометра 4 и далее на диспергирующее зеркало 5,

где происходит разложение светового потока в спектр. Полученное спектральное распределение интенсивности излучения через фокусирующую систему 7 формирует изображение спектра на КМОП-матрице 8. Изображение спектра записывается и анализируется с помощью компьютера. Для исключения внешней засветки вся оптическая система помещена в светонепроницаемый кожух 9.

Фоточувствительная область КМОП-матрицы размером 2,4x1,8 мм содержит 480 строк по 640 пикселей в каждой строке с размером пикселя 3,75 мкм. Параметры фокусирующей системы и расстояние, на котором размещается рабочая плоскость матрицы, выбирается таким образом, что бы на нее проецировалась основная часть спектра СИД. В качестве источника излучения были использованы СИД SMD типа FYLS-3528UR высокой яркости, обеспечивающие достаточную для фотоприемника мощность излучения при сверхнизком значении тока [7]. Спектр СИД проецируется строго вдоль строк матрицы и уровень сигналов пикселей матрицы вдоль строки будет изменяться пропорционально интенсивности соответствующей спектральной составляющей излучения. Если ширину спектра СИД спроецированного на поле матрицы обозначить $\Delta\lambda_{LED}$, то на каждый пиксель столбца матрицы будет приходиться излучение, соответствующее части спектра шириной $\Delta\lambda_{LED}/M$, где M – число столбцов матрицы. Таким образом, информация о длине волны спектра содержится в номере столбца матрицы; центральной длине волны спектра излучения соответствует номер столбца с максимальным уровнем сигнала. Для определения этого максимума при наличии шума использовались известные алгоритмы обработки, применяемые для отыскания максимума спектра для фотоприемных линеек [3, 4]. Для снижения погрешности, обусловленной разбросом фоточувствительности пикселей, применялось усреднение по столбцам значений сигналов.

В результате предварительного анализа факторов, влияющих на нагрев фотоприемника, были выбраны следующие условия проведения эксперимента:

- а) неизменный уровень излучения на всем протяжении эксперимента. Для этого СИД питается стабилизированным током минимального значения. Это исключает собственный разогрев СИД и связанный с этим сдвиг спектра излучения;
- б) стабильный температурный режим в рабочей зоне спектрофотометра для устранения термомеханических воздействий на оптическую систему обеспечивался термоизоляцией фотоприемника;
- в) фиксированное время экспозиции кадра.

Так как потребляемая фотоприемником мощность и, следовательно, температура нагрева, зависят от частоты опроса и времени экспозиции, то опытным путем по порогу чувствительности матрицы были определены минимальное время экспозиции, равное 98 мс, и минимальный ток СИД - 49 мкА;

г) визуальная юстировка оптической системы с симметричным размещением изображения на рабочем поле КМОП-матрицы.

После стабилизации в течение достаточно длительного времени параметров излучателя производилось включение исследуемой КМОП-матрицы. Компьютер по заданной программе считывал изображение с КМОП-матрицы и автоматически определял положение максимума спектра. Максимум спектра определялся по следующему алгоритму: изображение из цветного преобразовывалось в градации серого, затем сигналы с пикселей усреднялись по столбцам. Номер столбца, для которого среднее значение сигнала было наибольшим, принимался за координату положения максимума спектра и записывался в файл. По результатам предварительных измерений с помощью спектрофотометра USB2000 ширина спектра СИД по уровню 0,5 составила примерно 70 нм. Расстояние до матрицы подбиралось таким образом, что 1 пиксель соответствовал полосе спектра шириной 0,153 нм. Полученные и обработанные таким образом результаты приведены на рис. 2 и рис. 3.

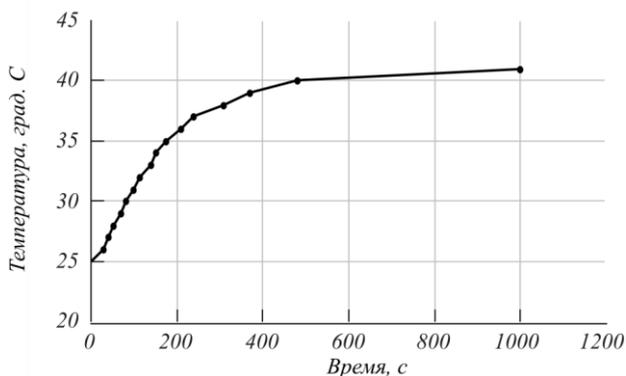


Рис. 2. Зависимость температуры фотоприемника от времени работы

На рис. 2 показана зависимость температуры в центре рабочей поверхности КМОП-матрицы, измеренная термопарой контактным способом с погрешностью $\pm 1 \text{ C}^0$ от времени работы фотоприемника при минимальном времени экспозиции и скорости записи видеопотока 30 кадров/с. Изменение приращения температуры (перегрева) в центре кристалла матрицы хорошо описывается выражением

$$\Delta T(t) = \Delta T_m \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right)$$

где $\Delta T_m = R_T \bar{P}$ – максимальный перегрев в центре рабочей поверхности матрицы, R_T – тепловое сопротивление, τ_T – тепловая постоянная времени переход-среда КМОП матрицы, \bar{P} – средняя мощность потребляемая матрицей, которая находится по формуле $\bar{P} = P_m (\tau_K / T_{Ц})$, где $T_{Ц} = \tau_{П} + \tau_{Э} + \tau_{К}$ – длительность одного цикла считывания информации. Для данной конструкции фотоприемника тепловая постоянная времени переход-среда матрицы составила примерно 200 с, за это время тепловой поток достигает границы корпуса фотоприемника и в его конструкции устанавливается стационарный тепловой режим.

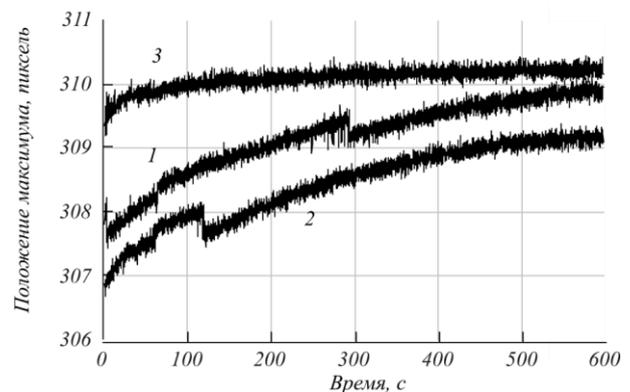


Рис. 3. Зависимость положения максимума спектра от времени работы:

1 – запуск измерения через 60 минут после включения светодиода; 2 – запуск через 10 минут после первого измерения (линия дополнительно смещена вниз на 1 пиксель для лучшего отображения); 3 – запуск через 5 с после второго измерения (матрица успела незначительно остыть).

На рис. 3 приведена зависимость положения максимума спектра от времени работы КМОП-матрицы при минимальном времени экспозиции. Максимальное смещение максимума соответствует расстоянию между двумя пикселями, то есть примерно 7-8 мкм. Из сопоставления графиков на рис. 2 и 3 видно, что темп смещения максимума спектра совпадает с темпом изменения температуры КМОП-матрицы. Это позволяет утверждать, что основной причиной наблюдаемого смещения максимума спектра является термодформация фотоприемника в результате ее саморазогрева. Одностороннее (изотропное) смещение положения максимума спектра определяется, по нашему мнению, способом закрепления фотоприемника. При продольном размере фотоприемника 2 см и увеличении температуры примерно на 20 К тепловое расширение на 8 мкм соответствует температурному

коэффициенту алюминия $2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Аналогичный эффект изотропного смещения изображения наблюдался авторами [6] для ПЗС матрицы. При пересчете к длине волны излучения абсолютная ошибка, вызванная собственным нагревом исследуемого фотоприемника, при минимально допустимом времени экспозиции 98 мс не превышает 0,74 нм. Наблюдаемые скачки на зависимости максимума спектра от времени определяются, на наш взгляд, дискретной структурой фотоприемника, в результате перехода максимума спектра излучения исследуемого СИД на следующий столбец КМОП-матрицы.

Для оценки влияния на погрешность, вносимую собственным разогревом КМОП-матрицы, длительности паузы τ_{II} между запросами фотоприемника и времени экспозиции $\tau_{\text{Э}}$, были исследованы зависимости положения максимума спектра от времени работы при фиксированных значениях времени экспозиции. Временная диаграмма работы матрицы показана на рис. 4. Время паузы τ_{II} устанавливается программной задержкой. Время экспозиции одного кадра для данного типа КМОП-матрицы $\tau_{\text{Э}}$ может изменяться от 1 мс до 2500 мс через интерфейс камеры. Серии измерений проведены для $\tau_{\text{Э}}$ равных 248 и 2500 мс, при различных τ_{II} равных 10, 100, 1000 мс. Значение $\tau_{\text{Э}}$ равно 248 мс – среднее значение экспозиции при скорости записи видеопотока 30 кадров/с. Результаты эксперимента приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что при большом времени экспозиции $\tau_{\text{Э}}$ равно 2500 мс смещение максимума спектра за время поведения эксперимента заметно меньше, чем при времени экспозиции 248 мс. Уменьшается и нестабильность положения максимума в процессе измерений. В предлагаемой модели это объясняется уменьшением средней мощностью рассеиваемой матрицей. При малом времени экспозиции $\tau_{\text{I}} = 248$ мс средняя рассеиваемая мощность возрастает и общее смещение спектра увеличивается.

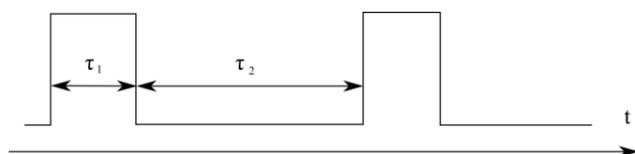


Рис. 4. Временная диаграмма работы матрицы: $\tau_1 = \tau_{\text{Э}} + \tau_{\text{K}}$ – сумма времени экспозиции и времени считывания кадра, $\tau_2 = \tau_{\text{II}}$ – пауза между запросами на считывание

При малом времени экспозиции на начальном участке переходной характеристики до 200 с наблюдались большие скачки максимума спектра, что вероятно определяется большими пульсациями температуры кристалла до выхода

матрицы в регулярный тепловой режим. При пересчете смещения к длине волны излучения для времени экспозиции равного 248 мс ошибка определения длины волны в максимуме спектра не превышает 0,61 нм. При увеличении времени экспозиции на порядок ошибка уменьшается в четыре раза (до 0,153 нм) и не превышает минимально возможного значения, соответствующего 1 пикселю.

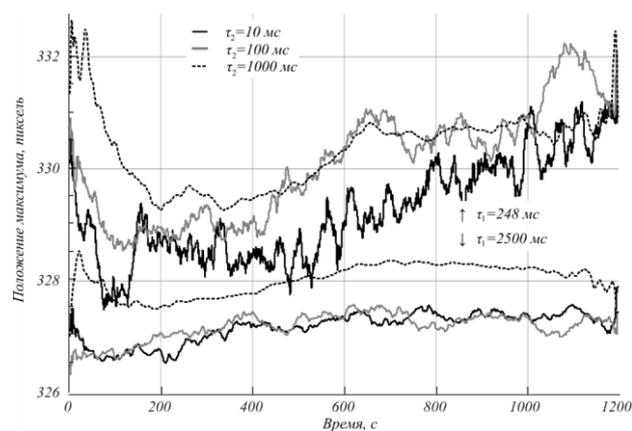


Рис. 5. Зависимость положения максимума спектра от времени работы при различном времени экспозиции (τ_1) и временем паузы между запросами на считывание (τ_2)

Выводы: показано, что применение фотоприемных КМОП-матриц в спектрофотометрических установках позволяет определять длину волны в максимуме спектра с точностью соответствующей одному пикселю за счет усреднения сигналов по столбцам. Наибольшее влияние на погрешность определения длины волны излучения в максимуме спектра, вызванную саморазогревом КМОП-матрицы, оказывает время экспозиции кадра. Для выполнения прецизионных измерений необходимо либо использовать большее время экспозиции при малом времени считывания, либо (если условия задачи ограничивают время экспозиции) предварительно вывести фотоприемник в стационарный тепловой режим, задав минимальное время экспозиции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Сергеев, В.А.* Методические погрешности определения параметров спектра светодиодов двумя фотоприемниками / *В.А. Сергеев, В.Н. Рогов, А.В. Ульянов* // Измерительная техника. 2013. №4. С. 42-45.
2. *Горбунов, Г.Г.* Особенности использования многоэлементных приемников в Фурье-спектрометрии / *Г.Г. Горбунов, И.Н. Сивяков, О.К. Таганов, В.Б. Шилов* // Известия вузов. Приборостроение. 2008. №9. С.60-65.
3. *Королев, А.Н.* Метрологические исследования и выбор формы оптической марки в цифровых измерительных системах / *А.Н. Королев, А.И. Гарицув,*

- Г.С. Полищук, В.П. Трезуб // Оптический журнал. 2010. № 6. С. 25-27.
4. Веснин, В.Л. Контрольно-измерительные системы на основе волоконно-оптических датчиков / В.Л. Веснин, А.А. Черторииский, В. Экке // Радиотехника и электроника. 2005. №6. С. 751-758.
5. Экке, В. Быстродействующая измерительная система на основе волоконно-оптических брэгговских датчиков для исследования деформации и температуры / В. Экке, А.А. Черторииский, В.Л. Веснин // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 4. С. 144-150.
6. Королев, А.Н. Точность измерения координат изображения на ПЗС-матрице / А.Н. Королев, А.И. Гарцуев // Измерительная техника. 2004. № 5. С. 20-22.
7. Беринцев, А.В. Исследование яркости SMD светодиодов при повышенных температурах в режиме стабилизации напряжения / А.В. Беринцев, С.Г. Новиков, И.С. Федоров // Известия самарского научно-го центра РАН. 2012. №4(4). С. 1005-1009.
8. Лавров, Б.П. Спектрометр высокой разрешающей силы с цифровой фоторегистрацией на базе спектрографа ДФС-8 / Б.П. Лавров, А.С. Михайлов, И.С. Умрихин // Оптический журнал. 2011. №3. С. 34-42.

INFLUENCE OF PHOTORECEPTION CMOS-MATRIX INTRINSIC HEATING ON THE ACCURACY MEASUREMENT OF OPTICAL RADIATION SPECTRUM PARAMETERS

© 2014 V. A. Sergeev^{1,2}, A.V. Berintsev³, S.G. Novikov³, A.A. Chertoriyskiy^{1,2}

¹ Ulyanovsk Branch of Institute of Radioengineering and Electronics
named after V.A. Kotelnikov RAS

² Ulyanovsk State Technical University

³ Ulyanovsk State University

The principle of action and block diagram of unit for measurement the spectrum parameters of narrow-band optical radiation by means of photoreception CMOS-matrix is described. The effect of image shift in a range of light-emitting diode as a result of intrinsic heating of CMOS-matrix during its work as a part of unit in various modes of radiation exposition and data read-out is experimentally investigated. The received results speak within model of uneven thermal expansion of a crystal of photoreception matrix because of its non-uniform heating when reading shots.

Key words: photoreception CMOS-matrix, light-emitting diode spectrum, image shift, photodetector self-heating, thermal expansion of a crystal

Vyacheslav Sergeev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director. E-mail: sva@ulstu.ru
Aleksey Berintsev, Engineer. E-mail: berints@mail.ru
Sergey Novikov, Candidate of Technical Sciences, Chief of the Laboratory. E-mail: novikovsg@ulsu.ru
Aleksey Chertoriyskiy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief of the Laboratory. E-mail: a-tchertor@yandex.ru