

УДК 621.383.72

doi: 10.32620/reks.2019.2.07

А. Д. ЕГОРОВ¹, В. А. ЕГОРОВ¹, С. А. ЕГОРОВ¹,
И. Е. СИНЕЛЬНИКОВ¹, М. Ф. БАБАКОВ²

¹ *Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

² *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*

МУЛЬТИСЕНСОРНАЯ КАМЕРА ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРИБОРАХ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ ЛИНЕЙНОЙ СТРУКТУРЫ

Предметом публикации является совершенствование аппаратуры и методов атомно-эмиссионного спектрального анализа для применения в лабораторной и промышленной практике. Целью является авторская разработка мультисенсорной камеры регистрации оптических спектров на базе приборов с зарядовой связью типа TCD1304AP компании TOSHIBA и методов ее исследования. Постановка задачи направлена на разработку и создание мультисенсорной камеры регистрации оптических спектров пригодной для применения в лабораторных и цеховых условиях при работе совместно с выпускаемыми промышленностью спектрографами различных оптических схем, а также разработка методов контроля температуры и линейности передаточной светосигнальной характеристики. Получены следующие результаты. Выполнена разработка мультисенсорной спектральной камеры. Раскрыты схемотехнические и конструктивные особенности разработанной камеры. Описана элементная база и функциональная схема. Исследована светосигнальная характеристика фотоприемников применительно к задаче спектрального анализа. Выполнены экспериментальные исследования темнового тока и нелинейностей передаточной функции детектора. Представлены несколько методик определения температуры фотоприемника без применения специальных термодатчиков. Приведен способ оценки нелинейностей по выполнимости закона взаимозаменяемости яркости спектральной линии и продолжительности экспозиции. Показана целесообразность использования закона о взаимозаменяемости для оценки линейности светосигнальной передаточной функции фотоприемников. Выводы. По результатам сравнительных исследований с работами других авторов обнаружены ситуации, когда закон взаимозаменяемости нарушается не только при больших, но и при малых уровнях сигнала. Раскрыты причины отклонений от линейности светосигнальных характеристик при малых уровнях освещенности. Предлагаются методы борьбы с блумингом при регистрации сильных линий. Разработанная аппаратура и результаты исследований использованы авторами в лабораторной практике на ряде промышленных предприятий Украины.

Ключевые слова: приборы с зарядовой связью; темновой ток; закон взаимозаменяемости; линейность светосигнальной функции; TCD1304AP.

Введение

Оптический спектральный анализ является в настоящее время одним из доминирующих методов определения элементного состава вещества. На его долю приходится более 80 % анализов в металлургии и машиностроении. Данный метод также широко используется в лабораторной практике геологических и экологических исследований, диагностике плазмы электроракетных двигателей [1, 2] и других технологических применениях. Большинство производителей аппаратуры спектрального анализа выпускает приборы с регистрацией спектра многоэлементными оптическими фотоприемниками различных типов. Многоэлементные детекторы позволяют регистрировать форму спектральных линий, учитывать влияние фона, взаимовлияние близкорасположенных линий [3]. Одними из самых распростра-

ненных типов фотоприемников используемых для регистрации спектров являются фоточувствительные приборы с зарядовой связью (ПЗС) [4]. Одной из проблем при регистрации спектров является широкий диапазон интенсивности спектральных линий, что предъявляет высокие требования к чувствительности и динамическому диапазону камер [5–7]. В работах [8, 9] приведены результаты определения динамического диапазона ПЗС детекторов для случая равномерного уровня засветки всех пикселей мощным светодиодным источником излучающим в сравнительно широком спектральном интервале. Используемые при этом методы не учитывают всю специфику исследований атомно-эмиссионных спектров, которая обусловлена линейчатым характером спектра и большим диапазоном амплитуд спектральных линий. В связи с этим возникает необходимость одновременных высокоточ-

ных определений, как положений, так и яркостных характеристик сильно отличающихся по амплитуде спектральных линий. Это выдвигает высокие требования ко всем элементам регистрирующей системы, в том числе, и к светосигнальной передаточной функции детектора. Целью настоящей работы является создание камеры для регистрации оптических спектров и исследование ее динамических характеристик применительно к задаче спектрального анализа.

Описание регистрирующей камеры

Разработка камеры осуществлена на базе широко распространенных и часто применяемых в спектральной аппаратуре ПЗС линейной структуры TCD1304 компании Toshiba [10]. Отличительными особенностями данных сенсоров является большая, сильно вытянутая, апертура пикселей (7×200 мкм), что хорошо согласуется с формой щели спектральных приборов, и широкий спектральный диапазон чувствительности (200-1100нм). Одним из недостатков, серийно выпускаемых ПЗС являются ограниченные линейные размеры фотоприемников. Так стандартный спектральный диапазон атомно-эмиссионных анализаторов составляет 200-400 нм при типичном разрешении 10пм и размерах изображения спектра ~ 200 мм, что обуславливает общее количество пикселей в регистрирующей камере порядка 20000. Выбранный ПЗС имеет длину фоточувствительной области 29,184 мм при общем количестве пикселей 3648, поэтому применение одиночных фотодетекторных линеек приемлемо только для спектрографов, имеющих низкое разрешение или узкий спектральный диапазон. Для регистрации полного спектра с приемлемым разрешением была разработана и изготовлена мультисенсорная камера, включающая 8 фотоприемников с возможностью индивидуального задания времени экспозиции для каждого сенсора. Блок-схема камеры изображена на рис. 1, а внешний вид на рис. 2.

Камера может устанавливаться на место кассеты с фотопластинкой в промышленные спектрографы типа ИСП-28, ИСП-30, ДФС-452, ДФС-458. Камера состоит из платы управления и двух мультисенсорных плат, расположенных одна над другой со сдвижкой на длину фоточувствительной зоны одного фотоприемника.

Плата управления включает контроллер интерфейса USB, для связи с внешним компьютером, выполненный на базе микросхемы FT232H компании FTDI Chips [11]. Он обеспечивает преобразование интерфейса USB 2.0 High Speed (480Mbps) в двунаправленный восьмиразрядный параллельный синхронный интерфейс. Формируемая контроллером

тактовая частота 60 МГц, является опорной для синхронизации всех остальных блоков камеры. Микросхема FT232H реализует логические и физические протоколы интерфейса USB 2.0 High Speed и имеет программные драйвера для нескольких операционных систем [11].

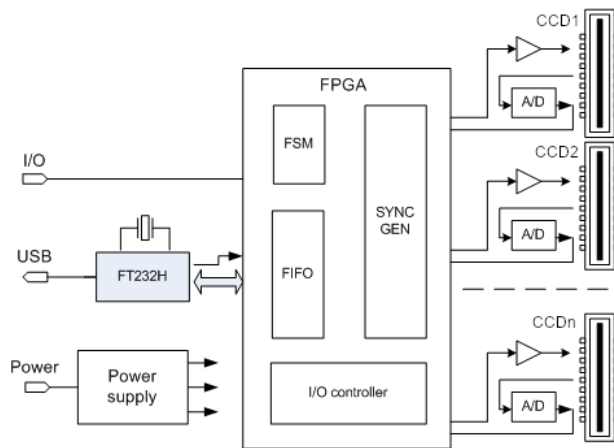


Рис. 1. Структурная схема мультисенсорной камеры: CCD1-CCDn – ПЗС, FPGA – программируемая логическая матрица, FT232H – контроллер интерфейса USB, A/D – аналого-цифровые преобразователи (АЦП), Power supply – схемы питания



Рис. 2. Внешний вид мультисенсорной камеры с 8-ю ПЗС сенсорами

Основные схемы синхронизации, управления, приема, преобразования и передачи данных выполнены на программируемой логической матрице (ПЛИ) EP3C10E144 семейства Cyclone3 компании Intel (Altera) [12].

Внутренняя структура ПЛИМ разрабатывалась в схемотехническом редакторе и на языке программирования VHDL в среде Quartus компании Altera [12].

На базе программируемой логической матрицы реализованы следующие блоки:

- Генератор опорных частот, вырабатываю-

ший из базовой частоты 60 МГц основные опорные частоты для синхронизации всех блоков камеры;

- Блок сопряжения с контроллером USB, обеспечивающий прием и передачу данных по восьмиразрядному синхронному интерфейсу микросхемы FT232HL;

- Управляющий логический автомат (FSM - finite-state machine), обеспечивающий прием, интерпретацию и выполнение команд, приходящих из базового компьютера через контроллер USB интерфейса;

- Формирователь тактовых сигналов ПЗС фотоприемников и АЦП;

- Схем формирования интервалов экспозиции и импульсов запуска источника возбуждения спектра;

- Схем преобразования данных АЦП, преобразующих последовательные данные, передаваемые из АЦП в параллельный двухбайтовый формат;

- Буферное ОЗУ с архитектурой FIFO (First Input - First Output) объемом 1кБ, служащее для буферизации данных USB контроллера.

Кроме того, на плате управления находятся схемы питания, состоящие из нескольких DC-DC преобразователей, обеспечивающих преобразование первичного напряжения питания +5 В в набор напряжений, необходимых для питания всех схем камеры, а также схемы интерфейса генератора, обеспечивающей связь с генератором дуги/искры для программирования режимов источника возбуждения спектра.

Мультисенсорные платы позволяют установить от 1 до 5 линейных ПЗС сенсоров на каждую, кроме того включают буферные формирователи сигналов, АЦП (по одному для каждого сенсора), схемы усиления и согласования уровней. На платах устанавливаются элементы крепления и зеркальные оптические отражатели, обеспечивающие регистрацию спектра двумя рядами сенсоров с некоторым перекрытием (до 10 %) между ними. Две платы собираются в пакет, образуя единый блок из линейных сенсоров (до 10 штук) с отражателями в шахматном порядке. С использованием такой мультисенсорной камеры были проведены экспериментальные исследования темнового тока детектора и нелинейностей его светосигнальной передаточной характеристики.

Исследование светосигнальной передаточной функции детектора

Рассмотрим задачу в общей спектрометрической постановке.

Пусть функция распределения спектральной мощности светового сигнала $f(\lambda)$ (аппаратная функция) отображается в фокальной плоскости спектрографа как зависимость $f(x)$, где координата x , направлена вдоль дисперсии прибора. При помощи многоэлементного фотоэлектрического детектора линейной структуры $f(x)$ преобразуется в одномерную последовательность отсчетов электрического сигнала f_n , которые являются результатами интегрирования функции $f(x)$ по площади пикселя с порядковым номером n за время экспозиции.

Передаточная характеристика такого детектора в общем виде может быть представлена выражением:

$$f_n = \tau \cdot Q_n \cdot \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x + \varphi) dx + N_n, \quad (1)$$

где τ – выдержка (продолжительность экспозиции); Q_n – светосигнальная характеристика n -го пикселя линейки фотодиодов; N_n – шумовая компонента; φ – инструментальный параметр, который характеризует сдвиги изображения спектра относительно детекторной линейки. Такие сдвиги могут быть преднамеренными - при сканировании спектра, или случайными – от температурных и механических воздействий. Шумовая компонента содержит шумы считывания N_r , шумы квантования АЦП N_{ADC} , темновой ток и другие. Темновой ток имеет регулярную и случайную составляющие. Регулярная составляющая может быть заранее зарегистрирована при закрытом оптическом входе спектрометра и исключена простым вычитанием из результатов измерений. Случайная компонента при каждом измерении разная и, поэтому, может быть уменьшена только усреднением за счет увеличения общего времени измерения. Общее время может быть увеличено удлинением выдержки и/или увеличением количества измерений.

Удлинение выдержки линейно увеличивает уровень полезного сигнала (произведение $\tau \cdot Q_n$) и пропорционально квадратному корню из τ увеличивает шумовую компоненту (в случае нормального шума). В итоге соотношение сигнал/шум растет, как $\sqrt{\tau}$. При увеличении количества измерений увеличивается количество считываний и пропорционально корню квадратному из их числа растет шумовая компонента. Поэтому при фиксированном общем времени измерения всегда выгодней идти по пути увеличения выдержки, насколько позволяет динамический диапазон детектора.

Экспериментальные исследования темнового тока детектора

Темновой ток отрицательно сказывается на точности измерений и, поэтому, он входит в состав шумовой компоненты N_n в формуле (1). Типичный образец записи темнового тока представлен на рис. 3 [13].

Он состоит из суммы случайной и регулярной периодической компоненты. Регулярная компонента смещена относительно аппаратного нуля на некоторую постоянную составляющую. Величина этого смещения отображена на рис. 3 разностью двух уровней, отмеченных круглыми и квадратными метками. Рассмотрим зависимость величины этого смещения от температуры кристалла детектора.

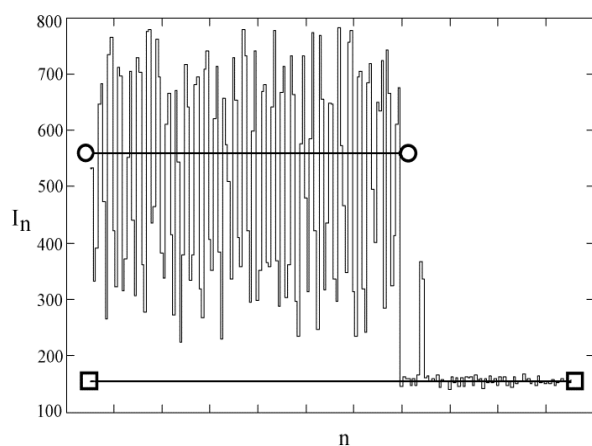


Рис. 3. Выходной сигнал детектора при закрытом оптическом входе. Уровень аппаратного нуля — □—□, уровень постоянной составляющей темнового тока — ○—○ [13]

Известно, что темновой ток ПЗС-детектора изменяется в 2 раза на каждые 8 градусов изменения температуры кристалла [14]. Темновой ток, как одно из слагаемых результата одиночного измерения, пропорционально забирает на себя часть динамического диапазона измерительной системы. При больших температурах и экспозициях вклад этого слагаемого может привести к “зашкаливанию” детектора. Поэтому при работе в реальных условиях заводской лаборатории и цеха желательно охлаждать детекторы, или хотя бы контролировать их температуру.

Измерения температуры кристалла каждой микросхемы сопряжено с усложнением схемы и проблемами конструктивного характера. Чтобы избежать усложнений схем, было проведено исследование возможности определения температуры кристалла по параметрам измеряемого сигнала, для решения проблемы на программном уровне. Исследо-

вание проводилось с использованием описанной выше установки с дополнениями для регулирования и контроля температуры сенсоров в диапазоне от -20°C до $+30^{\circ}\text{C}$ с точностью $0,1^{\circ}\text{C}$. Регулировка осуществлялась термоблоком на базе элементов Пельтье.

Таким образом, изучалась возможность использования самих сенсоров в качестве термодатчиков для определения их температуры. Для этого исследовалась функциональная зависимость от температуры величины следующих трех параметров выходного сигнала:

1) разницы между сигналом, полученным без засветки, и аппаратным нулём, измеряемым холостыми циклами сразу после окончания поступления сигнала со сдвигового регистра линейки ПЗС. Она отображена на рис. 3 разностью двух уровней, отмеченных круглыми и квадратными метками—(параметр №1). Среднеквадратическая ошибка при этом методе измерения температуры в диапазоне от -20°C до $+30^{\circ}\text{C}$ составила менее $0,2^{\circ}\text{C}$;

2) амплитуды периодической структуры (fixed pattern noise), изображенной на том же рисунке (параметр №2). При отрицательных температурах среднеквадратическая ошибка ее измерения, определяемая по этому параметру, доходит до 1°C и несколько десятых градуса при положительных значениях температуры;

3) шумов, получаемых при вычитании двух последовательных реализаций темнового тока (параметр №3). Поскольку при понижении температуры шумы уменьшаются, то при этом падает и точность определения температуры. При отрицательных температурах и малых экспозициях ошибка может доходить до 5°C .

Эти результаты получены по 16-ти измерениям темнового сигнала при -20°C , -10°C , 0°C , 10°C , 20°C , 30°C и разных экспозициях (от 0,035 до 16 секунд).

Ошибка измерения температуры определялась по разбросу значений соответствующего параметра с учетом тангенса угла наклона графика. По результатам проведенных экспериментов можно утверждать, что максимальная точность температурных измерений может быть получена по параметру №1 ($0,1^{\circ}\text{C}$), а минимальная — по параметру №3 (5°C).

Исследование нелинейности светосигнальной передаточной функции сенсора

Для изучения поведения передаточной функции сенсора от величины выдержки строилась зависимость профилей спектральных линий различных яркостей с вычитанием темнового тока в соответствии с методикой, рекомендованной в [15]. На ри-

сунке 4 изображены результаты фотометрирования одиночной спектральной линии, которые получены при шести выдержках от 0,1 сек. до 3,2-х сек.

Из этого рисунка следует, что с приемлемой степенью искажения зарегистрированы спектры только с тремя наименьшими выдержками. В остальных случаях сигнал отягощен заметными на глаз нелинейными искажениями - он ограничен сверху и имеет асимметрично затянутые фронты. Это связано со спецификой накопления и считывания зарядов в приборах с зарядовой связью. Цепи накопления, переноса и транспортировки заряда переполняются, и потому происходит его потеря и расплывание на соседние ячейки (blooming effect) [6, 7], причем преимущественно в направлении транспортировки в сдвиговом регистре ПЗС. Специфика накопления и считывания заряда детектора приводит также к заметной волнистости в насыщении при максимальных значениях сигнала. Отмеченные недостатки исключают возможность разделения близко расположенных и усложняют обработку одиночных линий. Если в качестве аналитического параметра использовать амплитудное значение спектральной линии, то, в приведенном на рис. 4 случае, для измерений годятся только первые три экспозиции. Для борьбы с блумингом можно использовать аппаратные и программные средства.

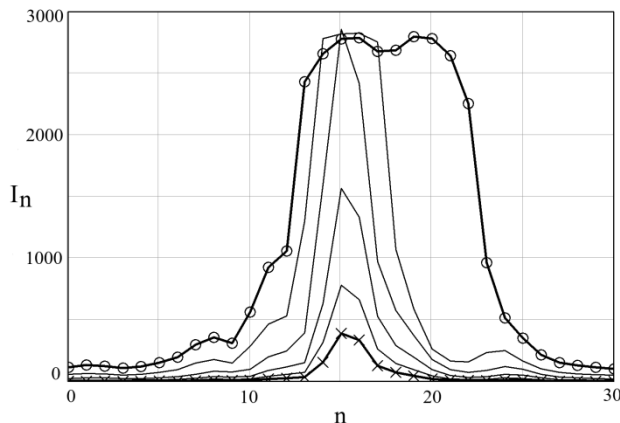


Рис. 4. Результаты фотометрирования спектральной линии с выдержками 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 3,2 секунды. x-x-x- результат при минимальной выдержке (0,1 секунды), o-o-o- с максимальной (3,2 секунды)

Среди аппаратных средств борьбы с растеканием зарядов предпочтительным является использование ПЗС детекторов с антиблумингом или детекторов, изготовленных по другим технологиям не подверженным эффекту блуминга. Они тоже обладают свето-сигнальными характеристиками с нелинейностями, для борьбы с которыми, в большей или меньшей мере, применимы представленные в этой

статье методы [16]. Кроме того, они, к сожалению, существенно дороже рассмотренных ПЗС детекторов TCD1304 фирмы Toshiba. К аппаратным средствам можно также отнести попытки уменьшения шумов считывания за счет изменения формы и длительности импульсов управления линейкой, но максимальный выигрыш, достигнутый при этом, составляет всего лишь 10 % [6]

Среди программных средств следует отметить оптимальный выбор выдержки в зависимости от яркости и формы анализируемой спектральной линии, а также оптимальный выбор аналитического параметра [17]. Рассмотрим использование в качестве аналитического параметра не амплитуды спектральной линии, а площади под ее кривой распределения. Поведение этого параметра от продолжительности экспозиции зависит от соблюдения закона взаимозаменяемости яркости и выдержки. Этот закон известен в фотохимии, как закон Бунзена-Роско, а в фотографической фотометрии, как закон Шварцшильда. В рассматриваемом нами случае, при его соблюдении отношение площади под кривой распределения яркости в линии S_n к величине экспозиции $H(E, \tau)$ не должно зависеть от величины выдержки τ и светового потока E . При линейной светосигнальной характеристике значения такого отношения для всех выдержек должны быть одинаковыми.

Если построить график зависимости этих значений от величины выдержки, то в случае соблюдения закона взаимозаменяемости должна получиться горизонтальная прямая линия, как это представлено в работе [7]. В действительности линия редко бывает прямой, и горизонтальной. Если полученные таким образом данные пронормировать для каждой спектральной линии по их максимальной величине, то получим зависимость площади от выдержки, изображенную на рис. 5. На этом рисунке представлены результаты фотометрирования трех спектральных линий, интенсивности которых соотносятся, приблизительно, как 11 : 115 : 560.

Из рисунка следует, что полученный таким образом закон взаимозаменяемости может нарушаться и при минимальных и при максимальных выдержках.

Мы не можем не согласиться с [6], что из физических соображений при слабых сигналах этот закон нарушаться не должен. Но, тем не менее, при определенных обстоятельствах он нарушается и в упомянутой работе, и в полученных нами результатах. Это связано не с уменьшением квантовой эффективности детектора, а со спецификой алгоритмов обработки получаемых данных. При уменьшении выдержки величина накопленного сигнала стремится к нулю и может стать соизмеримой с шу-

мами. В таком случае, при вычитании темнового тока, можно получить знакопеременную величину. Результат усреднения этой разности с уменьшением выдержки будет стремиться к нулю, что мы и наблюдаем экспериментально. Естественно, что чем слабее линия, тем сильнее проявляется этот эффект. В аналитической практике всегда стремятся избегать больших различий в яркостях между исследуемыми линиями и линиями сравнения, тогда этим эффектом можно пренебречь. Кроме того, влияние упомянутых факторов можно ослабить более корректной обработкой.

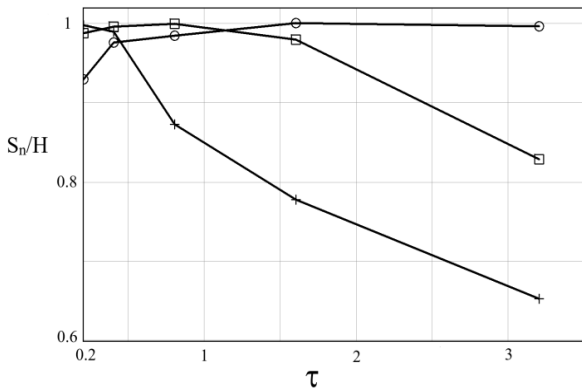


Рис. 5. Результаты вычисления площадей под кривыми распределения яркостей в зависимости от выдержки в секундах. Обозначения: спектральная линия с амплитудой 11 условных единиц – $\circ\circ\circ$, 115 условных единиц – $\square\square\square$, 560 условных единиц – $\times\times\times$

Для иллюстрации на рис. 6 представлен фрагмент спектра лампы ТМН, полученный по той же методике, что и рис 4, но с более слабыми линиями. Если производить исключение темнового тока его простым вычитанием из зарегистрированного сигнала, что довольно широко распространено в спектрометрической практике [15], то получим графики соблюдения закона взаимозаместимости с завалом кривых вблизи начала координат (рис. 7).

Спектральные линии малой интенсивности претерпевают только амплитудные искажения, при этом, в отличие от сильных линий, их форма не меняется. Кроме того, с уменьшением выдержки увеличивается роль шумов, что нарушает плавность кривых.

При больших сигналах, как следует из рис. 4, профиль спектральной линии искажается настолько, что аппроксимировать его аналитически становится затруднительным. Поэтому мы предлагаем включить эти особенности аппаратной функции в некоторый обобщенный параметр, который определяется экспериментально в виде таблицы.

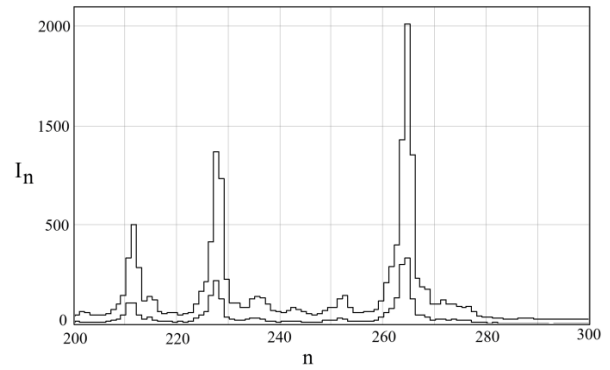


Рис. 6. Фрагмент спектра лампы ТМН. Верхний график – спектр, зарегистрированный при выдержке 3,2 сек., нижний – 0,8 сек.

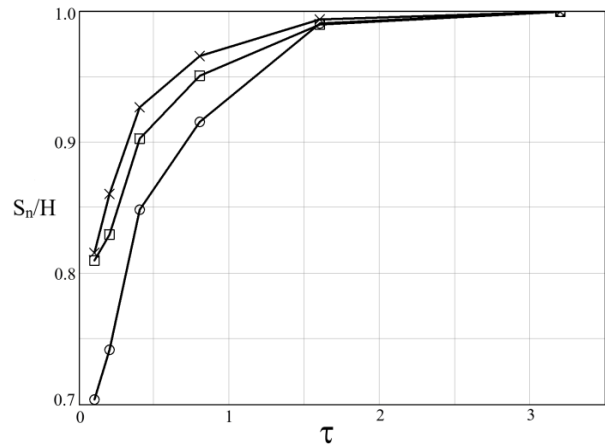


Рис. 7. Результаты вычисления площадей под кривыми распределения яркостей в зависимости от выдержки в секундах для трех спектральных линий, изображенных на рис. 6

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования на измерительной установке, разработанной авторами, свидетельствуют о возможности построения системы терморегуляции с применением самих сенсоров в качестве датчиков температуры. Показана целесообразность использования закона о взаимозаместимости яркости спектральных линий и продолжительности экспозиции для оценок линейности светосигнальной передаточной функции не только при больших, но и при малых экспозициях. Представленные особенности линеек ПЗС использованы авторами при создании ими методов и аппаратуры эмиссионного анализа для ряда промышленных предприятий Украины.

Литература

1. Хаустова, А. Н. Исследование скорости эрозии РК СПД 1,5 кВт методом ОЭССК во времени / А. Н. Хаустова, А. В. Лоян, Е. И. Ищенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017. – № 9 (144). – С. 74-79.

2. Rajput, R. U. Plasma plume diagnostics of low power stationary plasma thruster (SPT-20M8) with collisional-radiative model [Electronic resource] / R. U. Rajput, A. N. Khaustova, A. V. Loyan // *The European physical journal applied physics*. – 2017. – Vol. 78, № 1. – 9 p. – Access mode: <https://www.epjap.org/articles/epjap/abs/2017/04/ap160348/ap160348.html>. – 25.05.17.

3. Бабин, С. А. Быстродействующие анализаторы МАЭС на основе линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 / С. А. Бабин, Д. О. Селюнин, В. А. Лабусов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85, № 1 (II) С. 96 – 102. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-96-102

4. Danyang, Xu. Design and implementation of high sensitivity micro spectrometer based on area array CCD / Xu Danyang, Du Chunnian // *Opto-Electronic Engineering J.* 2018 Vol.45, №11 P. 30-40. DOI: 10.12086/oe.2018.180152

5. Jian-kang, Zh. Extended dynamic range techniques of CCD measurements / Zhou Jian-kang, Shen Wei-min, Tang Min-xue // *Opto-Electronic Engineering J.* – 2006. Vol. 33, №10. P.96-114.

6. Ухов, А. А. Оптические спектрометры с многоканальными фотоприемниками [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. тех. наук (05.11.07) / Ухов Андрей Александрович ; ЛЭТИ. – СПб, 2015. – 32 с.

7. Кострин, Д. К. Анализ спектральных линий с различной интенсивностью при диагностике технологических процессов / Д. К. Кострин // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2015. №1. С. 6-7.

8. Повышение точности и воспроизводимости результатов колориметрических измерений светоизлучающих диодов / Р. В. Юдин, Д. К. Кострин, Д. И. Шишов, А. А. Ухов // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2013. №3. С. 8-13.

9. McCormick, D T. Line Array Sensor Comparison [Electronic resource] / D T. McCormick. *AdvancedMEMS* 2016 13p. Access mode: http://www.advancedmems.com/pdf/AMEMS_LineSensorArraySummary_v1.pdf. – 10.05.19.

10. TCD1304AP Toshiba CCD Linear image sensor. Data Sheet. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/Toshiba-TCD1304AP-CCD-array.pdf> 03.03.2019.

11. FT232H - Hi-Speed Single Channel USB UART/FIFO IC [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232H.htm>. 03.03.2019.

12. Cyclone III FPGAs [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.intel.com/content/www/>

[us/en/products/programmable/fpga/cyclone-iii.html](https://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable/fpga/cyclone-iii.html). 03.03.2019.

13. Исследование температурных эффектов при регистрации спектров фотоэлектрическими детекторами / А. Д. Егоров, В. А. Егоров, С. А. Егоров, Л. И. Еленская, И. Е. Синельников // *Вісник НТУУ КІП. Серія Приладобудування*. – Київ, 2014. – Вып. 48(2). – С. 74-80.

14. Приборы с зарядовой связью [Текст] : пер. с англ. / под ред. М. Хоувза и Д. Моргана. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 376 с.

15. Программное обеспечение атомно-эмиссионного спектрального анализа (программа «АТОМ») / В. Г. Гаранин, О. А. Неклюдов, Д. В. Петрович, З. В. Семёнов, И. Г. Шаталов, С. В. Панкратов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т.78, № 1 (II). С. 69-74.

16. Nonlinear correction of the sensor S11639 in mini spectrometer. / Jianping Tong, Jianxun Gao, Fei Wang, Hao Yang. // *Opto-Electronic Engineering J.* 2017. Vol. 44, №11 P. 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.11.010

17. Градуировка методик атомно-эмиссионного анализа с компьютерной обработкой спектров / И. Е. Васильева, А. М. Кузнецов, И. Л. Васильев, Е. В. Шабанова // *Журнал аналитической химии*. – 1997. – Т. 52, № 12. – С. 1238-1248.

References

1. Khaustova, A. N., Loyan, A. V., Ishchenko, E. I. Issledovaniye skorosti erozii RK SPD 1,5 kWt metodom OESSK vo vremeni [Research of SPT 1.5 KW DC erosion rate in time with OESSC]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2017, no. 9 (144), pp. 74–79.

2. Rajput, R. U., Khaustova, A. N., Loyan, A. V. Plasma plume diagnostics of low power stationary plasma thruster (SPT-20M8) with collisional-radiative model. *The European physical journal applied physics*, 2017, vol. 78, no. 1. 9 p. Available at: <https://www.epjap.org/articles/epjap/abs/2017/04/ap160348/ap160348.html>. (accessed 25.05.17).

3. Babin, S. A., Selyunin, D. O., Labusov, V. A. Bystrodeistvuyushchie analizatory MAES na osnove lineek fotodetektorov BLPP-2000 i BLPP-4000 [MAES high-speed analyzers based on the BLPP-2000 and BLPP-4000 photodetector lines]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2019, vol. 85, no. 1 (II), pp. 96 – 102.

4. Danyang, Xu, Chunnian, Du. Design and implementation of high sensitivity micro spectrometer based on area array CCD. *Opto-Electronic Engineering J.*, 2018, vol. 45, no. 11, pp. 30-40. DOI: 10.12086/oe.2018.180152

5. Jian-kang, Zh., Wei-min, Sh., Min-xue, T. Extended dynamic range techniques of CCD measurements. *Opto-Electronic Engineering J.*, 2006, no.10, vol. 33, pp. 96-114.

6. Ukhov, A. A. *Opticheskiye spektrometry s mnogokanal'nymi fotopriyemnikami*. Avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk [Optical spectrometers with multichannel photodetectors. Dr. eng. sci. diss thesis]. St. Petersburg, «LETI», 2015. 32 p.
7. Kostrin, D. K. Analiz spektral'nykh liniy s razlichnoy intensivnost'yu pri diagnostike tekhnologicheskikh protsessov [Analysis of spectral lines with different intensity in the diagnosis of technological processes]. *Izvestiya SPbG-ETU «LETI»*, 2015, no. 1, pp. 6-7.
8. Yudin, R. V., Kostrin, D. K., Shishov, D. I., Ukhov, A. A. Povysheniye tochnosti i vosproizvodimosti rezul'tatov kolorimetriceskikh izmereniy svetozluchayushchikh diodov [Improving the accuracy and reproducibility of the results of colorimetric measurements of light-emitting diodes]. *Izvestiya SPbG-ETU «LETI»*, 2013, no. 3, pp. 8-13.
9. McCormick, D. T. *Line Array Sensor Comparison*. Advanced MEMS, 2016, 13P. Available at: http://www.advancedmems.com/pdf/AMEMS_LineSensorArraySummary_v1.pdf. (accessed 10.05.19).
10. *TCD1304AP Toshiba CCD Linear image sensor*. Data Sheet. TOSHIBA. Available at: <http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/Toshiba-TCD1304AP-CCD-array.pdf> (accessed 03.03.2019).
11. *FT232H - Hi-Speed Single Channel USB UART/FIFO IC*. Available at: <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232H.htm> (accessed 03.03.2019).
12. *Cyclone III FPGAs*. Available at: <http://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable/fpga/cyclone-iii.html> (accessed 03.03.2019).
13. Egorov, A. D., Egorov, V. A., Egorov, S. A., Elenskaya, L. I., Sinel'nikov, I. E. Issledovaniye temperaturnykh effektov pri registratsii spektrov fotoelektricheskimi detektorami [The study of temperature effects in the registration of spectra by CCD sensors]. *Visnik NTUU KPI. Seriya Priladobuduvannya*, Kyiv, 2014, vol. 48(2), pp. 74-80.
14. *Charge-coupled devices and systems*. edited by M. J. Howes, D. V. Morgan. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, 1979. (Russ. ed. *Pribory s zaryadovoy svyaz'yu*, Edited by M. Khouvz and D. Morgan, Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981. 376 p.)
15. Garanin, V. G., Neklyudov, O. A., Petrochenko, D. V., Semenov, Z. V., SHatalov, I. G., Pankratov, S. V. Programmnoye obespecheniye atomno-emissionnogo spektral'nogo analiza (programma «ATOM») [Software for atomic emission spectral analysis (ATOM program)] *Zavodckaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2012, vol. 78, no. 1, part II, pp. 69-74.
16. Tong, Jianping., Gao, Jianxun., Wang, Fei., Yang, Hao. Nonlinear correction of the sensor S11639 in mini spectrometer. *Opto-Electronic Engineering J.*, 2017, vol. 44, no. 11, pp. 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.11.010.
17. Vasil'yeva, I. E., Kuznetsov, A. M., Vasil'yev, I. L., Shabanova, E. V. Graduivovka metodik atomno-emissionnogo analiza s komp'yuternoy obrabotkoy spektrov [Graduation of methods of atomic emission analysis with computer processing of spectra]. *ZHurnal analiticheskoy khimii*, 1997, vol. 52, no. 12, pp. 1238-1248.

Поступила в редакцію 14.05.2019, рассмотрена на редколлегии 12.06.2019

МУЛЬТИСЕНСОРНА КАМЕРА ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ НА ПРИЛАДАХ З ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ ЛІНІЙНОЇ СТРУКТУРИ

А. Д. Єгоров, В. А. Єгоров, С. А. Єгоров,
І. Е. Синельников, М. Ф. Бабаков

Предметом публікації є вдосконалення апаратури і методів атомно-емісійного спектрального аналізу для застосування в лабораторній і промисловій практиці. **Метою** є авторська розробка мультисенсорної камери реєстрації оптичних спектрів на базі приладів із зарядовим зв'язком типу TCD1304AP компанії TOSHIBA і **методи** її дослідження. Постановка **завдань** спрямована на розробку і створення мультисенсорної камери реєстрації оптичних спектрів придатної для застосування в лабораторних і цехових умовах при роботі в складі спектрометрів різних оптичних схем, а також розробка методів контролю температури і лінійності передавальної світлосигнальної характеристики. Отримані наступні **результати**. Виконано розробку та виготовлення експериментального варіанту мультисенсорної спектральної камери. Описана застосована при цьому елементна база і функціональна схема, розкрито схемотехнічні та конструктивні особливості розробленої камери. На базі виготовленого автором обладнання досліджена світлосигнальна характеристика фотоприймачів з урахуванням специфіки задачі спектрального аналізу. Виконано експериментальні дослідження темного струму і нелінійностей передавальної функції детектора. Представлені кілька методик визначення температури фотодетекторів по параметрам темного струму без застосування спеціальних термодатчиків. Наведено спосіб оцінки нелінійностей по здійсненості закону взаємозамісності яскравості спектральної лінії і тривалості експозиції. Показана доцільність використання закону про взаємозамісність для оцінки лінійності світлосигнальної передавальної функції фотоприймачів. **Висновки**. За результатами порівняльних досліджень з роботами інших авторів виявлені ситуації, коли закон взаємозамісності порушується не тільки при великих, але і при малих рівнях сигналу. Розкрито причини відхилень від лінійності світлосигнальних характеристик при малих рівнях освітленості. Пропонуються методи боротьби з блумінгом

при реєстрації сильних ліній. Розроблена апаратура і результати досліджень використані в виробничій та лабораторній практиці на ряді промислових підприємств України.

Ключові слова: прилади з зарядовим зв'язком; темновий струм; закон взаємозамісності; лінійність світлосигнальної функції; TCD1304AP.

MULTISENSOR LINEAR CCD CAMERA FOR SPECTROMETRY

*A. Yegorov, V. Yegorov, S. Yegorov,
I. Sinelnikov, M. Babakov*

The subject matter of the publication is the improvement of equipment and methods of atomic emission spectral analysis for use in laboratory and industrial practice. The goal is the author's development of a multisensor camera for recording optical spectra based on TCD1304AP TOSHIBA type TCD1304AP devices and research methods. The tasks to be solved are: developing and creating a multisensor optical spectra registration camera suitable for use in laboratory and workshop conditions working in conjunction with industry-issued spectrographs of various optical schemes, as well as developing methods for controlling temperature and linearity of the light-transmitting signal characteristics. The following results were obtained: The development of a multisensory spectral camera. Disclosed circuit design and design features of the developed camera. The used hardware and functional diagram are described. The light-signal characteristic of photodetectors has been studied in conjunction with the problems of spectral analysis. Experimental studies of the dark current and nonlinearities of the transfer function of the detector have been performed. Several methods for determining the temperature of a photodetector without the use of special thermal sensors are presented. A method for estimating nonlinearities according to the feasibility of the law of reciprocity of the spectral line brightness and the duration of exposure is given. The expediency of using the law of reciprocity for estimation the linearity of the light-signal transfer function of photodetectors are shown. Conclusions. As the result of comparing studies of other authors with our works, the violation of the law of reciprocity of the spectral line brightness and the duration of exposure was discovered not only at high but also at low signal levels. The reasons for deviations from the linearity of the light-signal characteristics at low levels of illumination are revealed. The methods of dealing with blooming when registering strong lines are proposed. The developed equipment and research results are used by the authors in laboratory practice at several industrial enterprises in Ukraine.

Keywords: CCD; dark current; reciprocity law; linearity of the light-signal transfer function; TCD1304AP.

Егоров Анатолий Данилович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, Украина.

Егоров Вадим Анатольевич – вед. инж.-иссл., Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, Украина.

Егоров Сергей Анатольевич – мл. науч. сотр., аспирант, Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, Украина.

Синельников Игорь Енгович – мл. науч. сотр., Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, Украина.

Бабак Миколай Федорович – канд. техн. наук, профессор., Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Yegorov Anatoly – PhD, Senior Research, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: platvot@ukr.net.

Yegorov Vadim – Leading engineer-reaserch, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: ironbox@ukr.net

Yegorov Sergey – Reaserch, PhD student of O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: sergyegorov2012@gmail.com.

Sinelnikov Igor – Reaserch, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine.

Babakov Mikhail – PhD, Prof., National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: m.babakov@khai.edu.