

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКОВ АТОМНО-ЭМИССИОННЫХ АНАЛИЗАТОРОВ

А. Д. Егоров, В. А. Егоров, С. А. Егоров

УДК 543.423

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
61085, Харьков, ул. Академика Проскуры, 12, Украина; e-mail: yegorov@ire.kharkov.ua

(Поступила 30 ноября 2018)

*Исследован динамический диапазон приборов с зарядовой связью (ПЗС) на примере детектора типа TCD1304AP в атомно-эмиссионных спектрометрах. Для этого использована аппаратура авторской разработки с оригинальными методами измерения температуры сенсоров и анализом нелинейных искажений при разных уровнях сигнала. Для контроля нелинейностей трактов накопления и переноса заряда применен принцип взаимозаместимости яркости спектральных линий и выдержки. Обработка данных измерений и компенсация нелинейных искажений при разных уровнях сигнала осуществляются с помощью метода максимального правдоподобия. Выявлены условия, при которых искажения возникают не только при больших, но и при малых сигналах. Предложен метод использования блуминга для расширения динамического диапазона ПЗС-детекторов.*

**Ключевые слова:** атомно-эмиссионный анализ, приборы с зарядовой связью, закон взаимозаместимости, метод максимального правдоподобия, регистрация спектра, динамический диапазон.

*The dynamic range of charge-coupled devices (CCD), such as TCD1304AP, detector for atomic emission spectrometers is studied. For this purpose, we used the authors' novel equipment with original methods for measuring the temperature of sensors and analyzing nonlinear distortions at different signal levels. To control the nonlinearity of the paths of accumulation and charge transfer, we used the principle of reciprocity of the brightness of spectral lines and exposure. Measurement data processing and compensation of nonlinear distortions at different signal levels were carried out by the maximum likelihood method. The conditions were revealed under which distortions occurred not only at large but also at small signals. A method of using the blooming effect to expand the dynamic range of CCD detectors is proposed.*

**Keywords:** atomic emission analysis, charge-coupled devices, law of reciprocity, maximum likelihood method, spectrum registration, dynamic range.

**Введение.** Экспериментальные исследования ПЗС-детекторов, широко применяемых в атомно-эмиссионных спектрометрах, свидетельствуют об их недостаточном динамическом диапазоне для решения некоторых задач элементного анализа при спектрометрии плазменных образований [1—3]. Известно, что разогретое вещество в газообразном состоянии излучает линейчатый спектр. При этом интенсивность света, излучаемого возбужденным атомом при электронном переходе с уровня  $m$  на основной уровень, выражается формулой [4]:

$$I(T) = B \exp(-E_m/RT), \quad (1)$$

где  $B$  — константа;  $E_m$  — энергия возбужденного уровня;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура вещества. Согласно (1), влияние температуры плазмы на интенсивность линий особенно сильное, так как температура входит в показатель экспоненциальной функции. Плазменные образования, которые используются в атомно-эмиссионной спектрометрии, как правило,

---

### THE DYNAMIC RANGE OF CCD PHOTORECEPTORS FOR ATOMIC EMISSION ANALYZERS

A. D. Yegorov, V. A. Yegorov\*, S. A. Yegorov (O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Science of Ukraine, 12 Academician Proskura Str., Kharkiv, 61085, Ukraine; e-mail: yegorov@ire.kharkov.ua)

являются неоднородными в пространстве и нестационарными во времени, что выдвигает специфические требования к динамическому диапазону детектора излучения.

В работе [5] определен динамический диапазон детекторов типа CCD (ПЗС) и CMOS для случая равномерного уровня засветки всех пикселей мощным источником. Подобный подход к исследованию динамического диапазона использован в [6] для анализа светоизлучающих диодов. В [5, 6] изучен динамический диапазон детекторов применительно к регистрации мощных источников, излучающих в сравнительно широком спектральном интервале. Используемые при этом методы не учитывают всю специфику исследований узкополосных линейчатых спектров атомно-эмиссионной спектроскопии. В работах [7—10] обсуждается определение положения и амплитуды спектральных линий при работе детектора на линейном участке светосигнальной характеристики, однако применяемое суммирование отсчетов нескольких пикселей вблизи спектрального пика не является наиболее оптимальным способом обработки данных измерений. Такая обработка с использованием в качестве сглаживающего ядра гест-функции не учитывает формы аппаратной функции спектрометра, что отмечается в [11]. Показано [11], что для определения амплитуды спектральной линии с использованием гест-функции необходимо знать с высокой точностью положение ее максимума относительно пикселей фоточувствительной линейки. Более корректный подход к определению положения и амплитуды спектральных линий с помощью метода наименьших квадратов используется в [12].

**Влияние темнового тока на динамический диапазон детектора.** Рассмотрим задачу в общей спектроскопической постановке. Пусть функция распределения мощности в спектральной линии для светового сигнала  $f(\lambda)$  отображается в фокальной плоскости спектрографа как зависимость  $f(x)$ , где координата  $x$  направлена вдоль дисперсии прибора. С помощью 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.

Согласно [13], передаточная характеристика такого детектора в общем виде:

$$f_n = \tau \left[ \theta_n(T) + Q_n \int_{x_n}^{x_{n+1}} f(x + \varphi) dx \right] + N_n, \quad (2)$$

где  $\tau$  — выдержка (продолжительность экспозиции);  $T$  — температура кристалла;  $\theta_n(T)$  — зависимость темнового тока от температуры;  $Q_n$  — светосигнальная характеристика  $n$ -го пикселя линейки фотодиодов;  $N_n$  — шумовая компонента;  $\varphi$  — инструментальный параметр, характеризующий положение изображения спектра относительно детекторной линейки (оно может меняться преднамеренно — при сканировании спектра, как это делается при реализации субпиксельного разрешения детектора [14], или случайно — от температурных и механических воздействий); шумовая компонента  $N_n$  содержит шумы считывания, шумы квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и некоторые другие составляющие.

Рассмотрим проблемы, связанные с темновым током  $\theta_n(T)$ . Известно, что темновой ток детектора изменяется в два раза на каждые  $7^\circ\text{C}$  изменения температуры кристалла [15]. Темновой ток как одно из слагаемых результата одиночного измерения забирает на себя часть динамического диапазона детектора. 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. Обычно для измерения температуры применяются отдельные датчики, которые измеряют температуру электронного блока или всего спектрометра, и на основании этих данных элементами Пельтье осуществляется термостабилизация [8—10].

Измерение температуры кристалла каждой микросхемы сопряжено с усложнением схемы и проблемами конструктивного характера. Чтобы избежать усложнения схем, нами исследована возможность определения температуры кристалла по параметрам измеряемого сигнала для решения проблемы на программном уровне.

**Экспериментальная установка** представляет собой измерительную систему, состоящую из генератора плазмы, спектрографа ДФС-452 и фотоэлектрического регистрирующего блока. Управление работой комплекса и обработка данных осуществляются компьютером со специализированным программным обеспечением. На место фотографической пластины в спектрограф устанавливается фотоэлектрический блок, который описан в [16]. Он дополнен средствами измерения и регулировки температуры кристалла фотодетектора от  $-20$  до  $+40^\circ\text{C}$ . Регулировка температуры осуществлялась тер-

моблоком на базе элементов Пельтье с помощью полупроводниковых датчиков температуры. Термоблок калибровался в начале и в конце измерений. Кроме того, в состав прибора входят схемы синхронизации и управления, АЦП, интерфейсные схемы для связи с базовым компьютером. Детектирование светового потока осуществляется ПЗС-сенсорами линейной структуры TCD1304AP (Toshiba).

Анализ темновых токов проведен в диапазоне температур от  $-20$  до  $+30$  °С при выдержках от 0.035 до 4 с. На основе данных измерений изучена точность определения температуры по нескольким исследуемым параметрам темнового тока. Наибольшая точность получена при использовании в качестве параметра разницы между оцифрованным сигналом без засветки и аппаратным нулем, измеряемым после окончания считывания активных пикселей со сдвигового регистра ПЗС. Среднеквадратическая ошибка измерения температуры  $\sim 0.1$  °С. На основе анализа темнового тока детектора выявлен допустимый диапазон рабочих температур и экспозиций фотометрирования спектров.

Для минимизации влияния темнового тока в практике спектрального анализа часто прибегают к простому вычитанию его из результата измерений [17]. Для этого до или после регистрации спектра закрывают оптический вход спектрометра и записывают темновой ток с сопутствующими шумами и наводками. Разность этих двух записей не содержит постоянной составляющей темнового тока. Этой разностью определяется нижний предел рабочего участка светосигнальной передаточной функции сенсора. Отношение максимального и минимального значений рабочей характеристики определяет динамический диапазон сенсора. Для оценки этого отношения необходимо знать степень нелинейности передаточной функции в пределах всей рабочей характеристики.

**Исследование нелинейности светосигнальной передаточной функции сенсора.** Для изучения поведения передаточной функции сенсора от выдержки построена зависимость профилей спектральных линий различных яркостей с вычитанием темнового тока. Из результатов фотометрирования одиночной линии, полученных при восьми выдержках от 0.1 до 4 с (рис. 1), следует, что с приемлемой степенью искажения зарегистрированы спектры только с тремя наименьшими выдержками. В остальных случаях сигнал отягощен заметными нелинейными искажениями — он ограничен сверху и имеет сильно затянутый задний фронт. Это связано со спецификой накопления и считывания зарядов в ПЗС. Цепи накопления, переноса и транспортировки заряда переполняются, поэтому происходят его потеря и растекание на соседние ячейки (blooming effect). 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 амплитуду спектральной линии, то в приведенном на рис. 1 случае для измерений годятся только три первые экспозиции. Для борьбы с блумингом можно использовать аппаратные и программные средства.

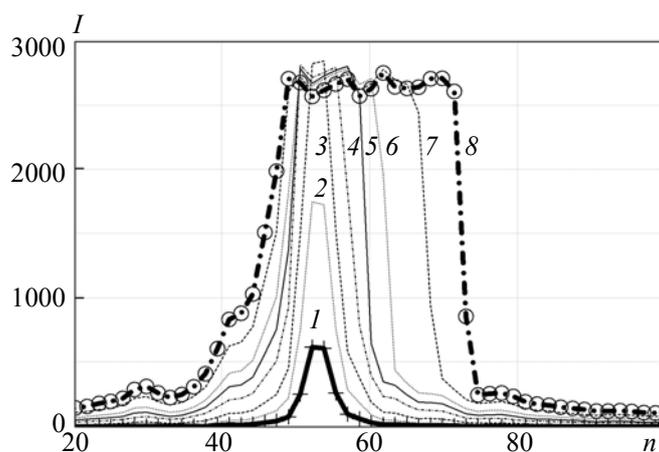


Рис. 1. Результаты фотометрирования спектральной линии ртути  $I(n)$  с выдержками 0.10 (1), 0.25 (2), 0.50 (3), 1.00 (4), 1.50 (5), 2 (6), 3 (7) и 4 с (8)

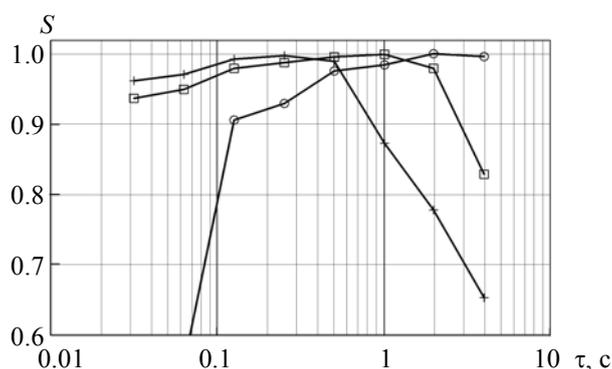


Рис. 2. Зависимости площадей под кривыми распределения яркостей  $S(\tau)$  от выдержки для спектральных линий с амплитудами 11 ( $\circ$ ), 115 ( $\square$ ) и 560 усл.ед. ( $+$ )

Среди аппаратных средств борьбы с растеканием зарядов предпочтительно использование ПЗС-детекторов с антиблумингом или детекторов, изготовленных по другим технологиям, не подверженным эффекту блуминга. Они также обладают светосигнальными характеристиками с нелинейностями, для борьбы с которыми в большей или меньшей мере применимы представленные методы. К сожалению, они существенно дороже рассмотренных ПЗС-детекторов TCD1304AP Toshiba. К аппаратным средствам можно отнести попытки уменьшения шумов считывания за счет изменения формы и длительности импульсов управления линейкой, однако достигнутый при этом максимальный выигрыш всего 10 % [2].

Среди программных средств следует отметить оптимальный выбор выдержки в зависимости от яркости и формы анализируемой спектральной линии, а также правильный выбор аналитического параметра [18]. 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 взаимозаместимости яркости и выдержки. Этот закон известен в фотохимии как закон Бунзена—Роско, а в фотографической фотометрии — как закон Шварцшильда. В рассматриваемом случае при его соблюдении произведение площади под кривой распределения яркости в линии и длительности экспозиции не должно зависеть от выдержки. При линейной светосигнальной характеристике такое произведение для всех выдержек должно быть одинаковым.

Если построить зависимости этих значений от выдержки, то в случае соблюдения закона взаимозаместимости должна получиться горизонтальная прямая, как в работе [7]. В действительности линия никогда не бывает ни прямой, ни горизонтальной. Если найденные таким образом данные нормировать для каждой спектральной линии по их максимальной величине, то получается зависимость площади от выдержки  $S(\tau)$ , показанная на рис. 2. Из представленных результатов фотометрирования трех спектральных линий, интенсивности которых соотносятся как  $\sim 11:115:560$ , следует, что полученный таким образом закон взаимозаместимости может нарушаться и при минимальных, и при максимальных выдержках.

Не можем не согласиться с автором [3] в том, что из физических соображений при слабых сигналах этот закон нарушаться не должен. Тем не менее при определенных обстоятельствах он нарушается и в [3], и в настоящей работе. Это связано с тем, что при уменьшении выдержки величина накопленного сигнала стремится к нулю и может стать соизмеримой с шумами. В этом случае при вычитании темнового тока можно получить знакопеременную величину. Результат усреднения этой разности с уменьшением выдержки стремится к нулю, что и наблюдается экспериментально. Естественно, чем слабее линия, тем сильнее проявляется этот эффект (рис. 2). В аналитической практике, как правило, присутствует фон, что позволяет пренебречь этим эффектом. Кроме того, влияние упомянутых факторов можно ослабить более корректной обработкой с помощью, например, метода наименьших квадратов. Для этого необходимо ввести дополнительные параметры, которые исключают появление отрицательных значений интенсивности. Спектральные линии малой интенсивности претерпевают только амплитудные искажения, при этом в отличие от сильных линий их форма не изменяется. При больших сигналах, как следует из рис. 1, профиль спектральной линии искажается настолько, что аппроксимировать его аналитически становится затруднительным. Поэтому предлагаем включить

эти особенности аппаратной функции в некоторый обобщенный параметр, который определяется экспериментально в виде таблицы.

**Линеаризация светосигнальной передаточной функции ПЗС-детектора при больших сигналах.** В связи с тем что амплитуды большого числа анализируемых линий и линий сравнения отличаются разнообразием, необходимо иметь соответствующий динамический диапазон для их неискаженного одновременного фотометрирования. Если это сделать невозможно, то прибегают к процедуре линеаризации с использованием данных о соблюдении закона взаимозаменяемости, подобных рис. 2. Аналогичную процедуру приходится делать и при использовании сенсоров с антиблумингом [19]. Наличие антиблуминга всегда предполагает их нелинейную светосигнальную характеристику за счет слива заряда, превышающего определенное значение. Однако всякого рода потери, в том числе заряда, отрицательно сказываются на точности. В этом смысле ПЗС-регистраторы без антиблуминга более полно регистрируют генерированный светом заряд, хотя это приводит к уширению и несимметричной деформации линий спектра. Особенно вредным является расползание заряда в одну сторону, так как это маскирует соседние линии. Для изучения этого явления проведена одновременная регистрация спектра на две линейки, развернутые на  $180^\circ$ . Полученные при этом результаты фотометрирования очень яркой линии представлены на рис. 3, *а*, *б*, где изображена одна и та же линия с двумя выдержками при транспортировке заряда в противоположных направлениях. Если их умозрительно разрезать симметрично относительно спектральной линии, зарегистрированной на линейном участке светосигнальной характеристики (кривая 2), а потом сложить по линии разреза, то из полученных двух графиков можно составить один, представленный на рис. 3, *в*.

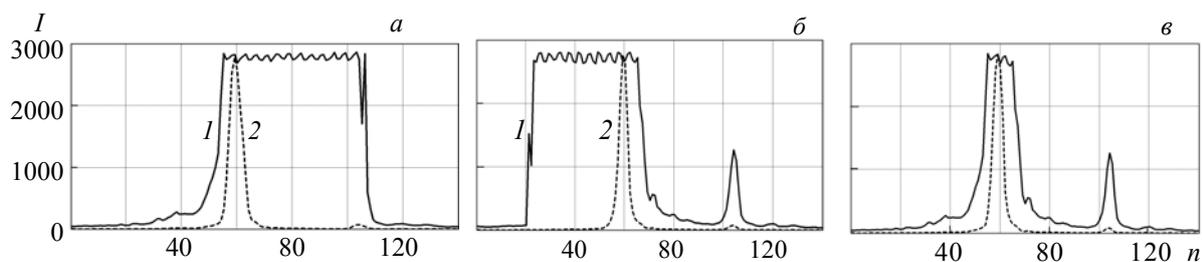


Рис. 3. Спектры с выдержкой 4 с в условиях растекания заряда (1) и с выдержкой 0.25 с в условиях, близких к линейному режиму (2), при направлении сдвига в транспортном регистре вправо (*а*) и влево (*б*); *в* — спектр с большой выдержкой, скомпилированный из неискаженных частей сильно пересвеченной линии (сплошная кривая), та же спектральная линия с малой выдержкой (пунктир)

Если для выполнения этой процедуры использовать инструменты метода наименьших квадратов, то можно надеяться на ее достаточную корректность. “Отрезанную” часть целесообразно использовать для оценки амплитудного параметра. Таким образом, для оценки площади под спектральной кривой наличие блуминга можно превратить из недостатка в преимущество. В результате получим линейно зарегистрированные слабые линии и восстановленные редко расположенные сильные линии. Амплитудные характеристики этих сильных линий могут быть восстановлены с привлечением данных об их уширении (рис. 1) и о соблюдении закона взаимозаменяемости (рис. 2), что позволит в разы увеличить динамический диапазон. Степень возможного уширения зависит от вида спектра, и более надежное заключение о применимости этого метода можно сделать только по результатам его практического применения. Например, по данным рис. 3 яркая спектральная линия за счет блуминга уширяется в  $\sim 16$  раз и можно надеяться на такое же увеличение динамического диапазона. В действительности оно несколько меньше из-за потерь, связанных с несоблюдением закона взаимозаменяемости, которые, судя по рис. 2, могут достигать до 40 %. В конкретном случае рис. 3, *а*, *б* отношение площадей под линиями 1 и 2  $\sim 14.7$ . Таким образом, в результате выполнения описанных преобразований получаем линеаризованную версию спектра с увеличенным динамическим диапазоном. Для окончательной обработки линейной версии спектра лучше всего применять метод максимального правдоподобия [12].

Пусть аппаратная функция спектрометра  $f(x, p_\alpha)$  зависит от координаты  $x$  и некоторого количества параметров  $p_\alpha$ , где  $\alpha$  — порядковый номер параметра. При регистрации спектра проводится

$n$  измерений в точках  $x_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) с некоторой среднеквадратичной ошибкой  $\varepsilon_i$ . По этим данным получается последовательность  $n$  отсчетов:

$$f_i = f(x_i, p_\alpha) + \varepsilon_i. \quad (3)$$

В соответствии с подходом [12] найдем наиболее вероятные значения параметров, минимизируя сумму квадратов невязок между априорными данными и измеренными. В этом случае логарифмическая функция правдоподобия имеет вид:

$$L(x, p_\alpha) = \text{const} - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n [f(x_i, p_\alpha) - f_i]^2, \quad (4)$$

где  $\sigma^2$  — мощность нормального шума.

Для определения набора параметров, которые минимизируют (4), приравняем к нулю частные производные функции правдоподобия по всем параметрам:

$$\sum_{i=1}^n [f(x_i, p_\alpha) - f_i] \frac{\partial f(x_i, p_\alpha)}{\partial p_\alpha} = 0. \quad (5)$$

В результате получаем систему уравнений по числу искомым параметров. Решение этой системы дает набор их наиболее вероятных значений  $\bar{p}_\alpha$ .

Характеристикой ошибки является вторая производная функции правдоподобия по соответствующему параметру при  $p_\alpha = \bar{p}_\alpha$ :

$$\frac{\partial^2 L}{\partial p_\alpha^2} = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(x_i, p_\alpha)}{\partial p_\alpha} \right]^2. \quad (6)$$

При измерении амплитуды сигнала в случае линейной передаточной характеристики детектора аппаратную функцию спектрометра можно представить в виде

$$f(x, p_\alpha) = Av(x), \quad (7)$$

где  $A$  — искомая амплитудная характеристика спектральной линии;  $v(x)$  — нормированная по максимальному или по интегральному значению функция, которая описывает распределение яркости спектральной линии вдоль дисперсии. Если не выходить за пределы линейной области детектора, то  $v(x)$  не зависит от амплитуды и уравнение (5) запишется в виде:

$$\sum_{i=1}^n [f(x_i, A) - f_i] v(x_i) = 0. \quad (8)$$

Подставляя (7) в (8), с точностью до константы получаем выражение

$$A = \sum_i f_i v(x_i), \quad (9)$$

которое описывает в рамках метода максимального правдоподобия процедуру сглаживания экспериментальных данных стационарным ядром  $v(x)$ . В качестве ядра сглаживания  $v(x)$  часто применяют функцию  $\text{rect}(x)$  (когда используют суммирование по некоторому числу пикселей [8, 10, 17]) или функцию нормального распределения Гаусса [18]. Интуитивно понятно, что использование прямоугольного ядра сглаживания не оптимально по нескольким причинам. В этом случае все отсчеты спектральной линии усредняются с одинаковым весом, хотя отношение сигнал/шум вблизи ее максимума выше, чем на периферии. Результат также зависит от ширины окна сглаживания и его положения относительно детекторной линейки. С увеличением окна растет точность, но падает разрешение. Поэтому иногда приходится прибегать к ручному управлению с участием оператора, что увеличивает субъективную компоненту ошибки. Некоторые соображения по этому поводу приводятся также в [11]. По этим причинам при обработке результатов измерений желательно отдавать предпочтение представленному выше методу максимального правдоподобия. Это подтверждается одним из основных свойств данного метода — если существует достаточная и эффективная оценка параметра, то метод дает именно эту оценку и более точной оценки найти нельзя [20].

**Закключение.** Анализ представленных экспериментальных результатов позволяет сделать следующие выводы. Вычитание из анализируемого спектра темнового тока и других шумовых составляющих, зарегистрированных с закрытым оптическим входом спектрографа, может приводить к искажениям результатов измерений при малых экспозициях. В этом случае получаемая разность может стать знакопеременной и закон взаимозаменяемости нарушается, что приводит к амплитудным искажениям при регистрации слабых световых потоков и требует соответствующей коррекции в алгоритмах обработки. При наличии фона, превышающего темновой ток, вычитание не приводит к отрица-

тельными интенсивностям и этим фактором обычно пренебрегают. Основным ограничивающим фактором динамического диапазона в случае сильных сигналов является перегрузка цепей накопления и переноса фотоэлектрических зарядов структурами детектора (blooming). Возможно использование этого вредного эффекта для расширения динамического диапазона фотоприемника.

Для ослабления влияния указанных факторов на результаты анализа предлагается в процессе измерений осуществлять контроль нелинейностей трактов накопления и переноса заряда по выполнимости принципа взаимозаменяемости яркости линий и продолжительности экспозиции. Этот принцип — очень чувствительный индикатор не только в случае перегрузки, но и в случае слабых сигналов. При регистрации слабых сигналов необходимо тщательно контролировать температуру кристалла детектора. Для определения температуры кристалла при работе в реальных условиях целесообразно использовать превышение уровня темнового тока над аппаратным нулем. По результатам испытаний предложенный метод обеспечивает точность лучше 0.1 °C в случае положительных температур и может быть реализован не на аппаратном, а на программном уровне при первоначальной калибровке на стадии изготовления аппаратуры. В случае больших сигналов необходимо выбирать наименее подверженные действию перегрузки аналитические параметры. По нашим оценкам для амплитудного параметра наиболее подходит площадь под спектральной линией. Предложен метод использования несимметрично растекающегося при перегрузке заряда для расширения динамического диапазона при взаимно противоположных направлениях транспортных регистров приборов с зарядовой связью относительно спектра. Это сопряжено с удвоением количества детекторов, но позволяет многократно увеличить динамический диапазон.

- [1] **Jian-Kang Zhou, Wei-Min Shen, Min-Xue Tang.** Opto-Electron. Eng. J., **33**, N 10 (2006) 96—114
- [2] **А. А. Ухов.** Оптические спектрометры с многоэлементными фотоприемниками, автореф. дис. ... д-ра тех. наук, СПб, ЛЭТИ (2015)
- [3] **Д. К. Кострин.** Изв. СПбГЭТУ, № 1 (2015) 6—7
- [4] **А. А. Пупышев.** Атомно-абсорбционный спектральный анализ, Москва, Техносфера (2009)
- [5] **D. T. McCormick.** Line Array Sensor Comparison. Hamamatsu S11639, Sony ILX511B, Toshiba TCD1205DG; [http://www.advancedmems.com/pdf/AMEMS\\_LineSensorArraySummary\\_v1.pdf](http://www.advancedmems.com/pdf/AMEMS_LineSensorArraySummary_v1.pdf)
- [6] **Р. В. Юдин, Д. К. Кострин, Д. И. Шишов, А. А. Ухов.** Изв. СПбГЭТУ, № 3 (2013) 8—13
- [7] **D. K. Kostrin, A. A. Lisenkov, A. A. Uhov, A. N. Ramazanov.** J. Phys., Ser. Conf., **729** (2016) 012030
- [8] **Я. И. Дидковский, М. Н. Коваленко, А. А. Минько, М. Р. Последович.** Вестн. БГУ. Сер. 1, № 1 (2015) 21—25
- [9] **В. А. Лабусов, В. Г. Гаранин, И. Р. Шелпакова.** Журн. аналит. химии, **67**, № 7 (2012) 697—707
- [10] **А. П. Демин, Ю. П. Чугунов.** Опт. журн., **79**, № 3 (2012) 51—55
- [11] **А. Д. Егоров, В. А. Егоров, С. А. Егоров, Е. В. Здор.** Радиофизика и электроника, **7**, № 2 (2002) 422—425
- [12] **Е. Л. Косарев.** Методы обработки экспериментальных данных, Москва, Физматлит (2008)
- [13] **А. Д. Егоров, В. А. Егоров, С. А. Егоров, Л. И. Еленская, И. Е. Синельников.** Вестн. НТУУ “КПИ”. Сер. Приборостроение, **48**, № 2 (2014) 74—80
- [14] **A. Yegorov, V. Yegorov, S. Yegorov.** Радиофизика и радиоастрономия, **14**, № 1 (2009) 77—83
- [15] Приборы с зарядовой связью, под ред. М. Хоувза и Д. Моргана, пер. с англ., Москва, Энергоатомиздат (1981)
- [16] **В. А. Егоров, С. А. Егоров.** Наука и инновации (Киев), **4**, № 2 (2008) 33—39
- [17] **В. Г. Гаранин, О. А. Неклюдов, Д. В. Петроченко, З. В. Семёнов, И. Г. Шаталов, С. В. Панкратов.** Зав. лаб. Диагностика материалов, **78**, № 1, часть II (2012) 69—74
- [18] **И. Е. Васильева, А. М. Кузнецов, И. Л. Васильев, Е. В. Шабанова.** Журн. аналит. химии, **52**, № 12 (1997) 1238—1248
- [19] **Jianping Tong, Jianxun Gao, Fei Wang, Hao Yang.** Opto-Electron. Eng. J., **44**, N 11 (2017) 1101—1106
- [20] **Д. Худсон.** Статистика для физиков, Москва, Мир (1970)