

## **Исследование нелинейности чувствительности ПЗС сенсоров TCD1304 и влияющих на нее факторов**

С.А. Егоров, В.А. Егоров

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина E-mail: [yegorov@ire.kharkov.ua](mailto:yegorov@ire.kharkov.ua)*

*В статье представлены результаты исследований динамического диапазона приборов с зарядовой связью типа TCD1304 в атомно-эмиссионных спектрометрах. Выявлены условия, при которых нелинейные искажения, возникают не только при больших, но и при малых сигналах. Для контроля нелинейностей трактов накопления и переноса заряда использован принцип взаимозаменяемости яркости спектральных линий и выдержки.*

*The article presents the results of TCD1304 CCD sensors dynamic range studies. The conditions of non linear distortions on both low and high level signals were revealed. The principle of reciprocity the spectral lines brightness and exposure time are used in order to the estimation of nonlinearity.*

### **Введение.**

В последнее время в спектральной аппаратуре видимого, ультрафиолетового и ближнего инфракрасного диапазонов все больше применяются полупроводниковые фотодетекторы, в частности, приборы с зарядовой связью (ПЗС). Наряду с множеством положительных качеств детекторов такого типа они обладают недостаточным динамическим диапазоном для решения задач атомно-эмиссионного анализа при спектрометрии плазменных образований. Это приводит к необходимости более аккуратного выбора условий фотометрирования, что невозможно без досконального знания сильных и слабых сторон применяемого детектора.

Рассматривались проблемы, связанные с темновым током и другими аспектами, влияющими на результирующий сигнал.

Известно, что темновой ток детектора изменяется в 2 раза на каждые 7 градусов изменения температуры кристалла. Измерения температуры кристалла каждой микросхемы сопряжено с усложнением схемы и проблемами конструктивного характера. Чтобы избежать усложнений схем, нами было проведено исследование возможности определения температуры кристалла по параметрам измеряемого сигнала, для решения проблемы на программном уровне.

В результате этой работы [1] было отработана методика измерения температуры кристалла сенсора по шумам в слепой области сенсора, что позволяет анализировать температуру без дополнительных аппаратурных затрат. Также было показано, что снижение температуры сенсоров ниже 10°C уже не дает существенного снижения шумов.

### **Экспериментальные исследования нелинейностей в зависимости от величины сигнала.**

Для корректного измерения амплитуды спектральной линии, необходимо учитывать аппаратную функцию прибора. Пусть аппаратная функция спектрометра зависит от координаты  $x$  и некоторого количества параметров  $p_\alpha$ , т.е. имеет вид:  $f(x, p_\alpha)$ , где  $\alpha$  - порядковый номер параметра. В процессе регистрации спектра мы производим  $n$  измерений в точках  $x_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) с некоторой среднеквадратичной ошибкой  $\varepsilon_i$ . По этим данным получим последовательность  $n$  отсчетов:

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

где:  $\varepsilon_i$  - ошибка отдельного измерения. В соответствии с подходом, изложенным в [2] найдем наиболее вероятные значения параметров, минимизируя квадрат суммы невязок между априорными данными и измеренными значениями. В этом случае логарифмическая функция правдоподобия имеет вид:

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

где:  $\sigma^2$  - мощность нормального шума.

Решение задачи определения оптимальных значений амплитуды спектральной линии предполагает использование линейного детектора. Но на практике бывает трудно найти достаточно линейный участок передаточной функции детектора.

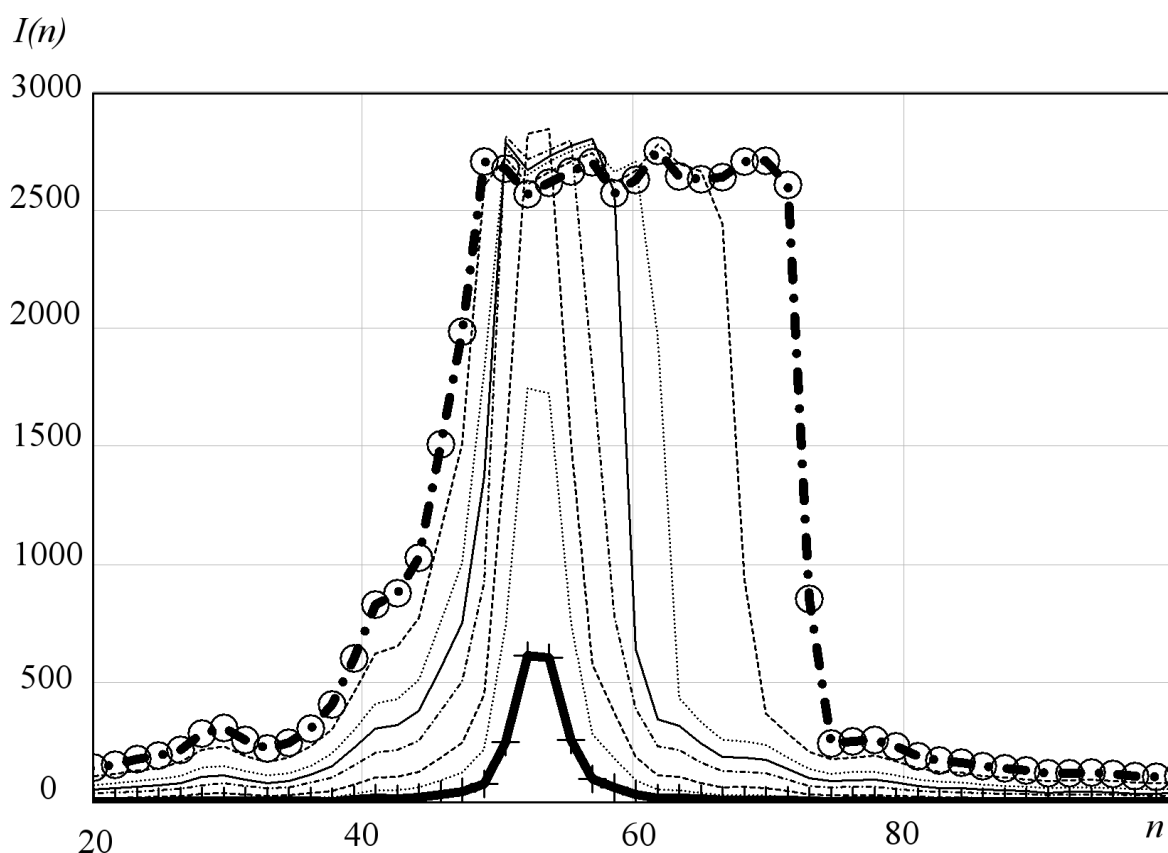


Рис. 1. Результаты фотометрирования спектральной линии ртути  $I(n)$  с выдержками 0.1, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4 секунды. Обозначения: экспозиция 0.1 секунды – +++, 4 секунды

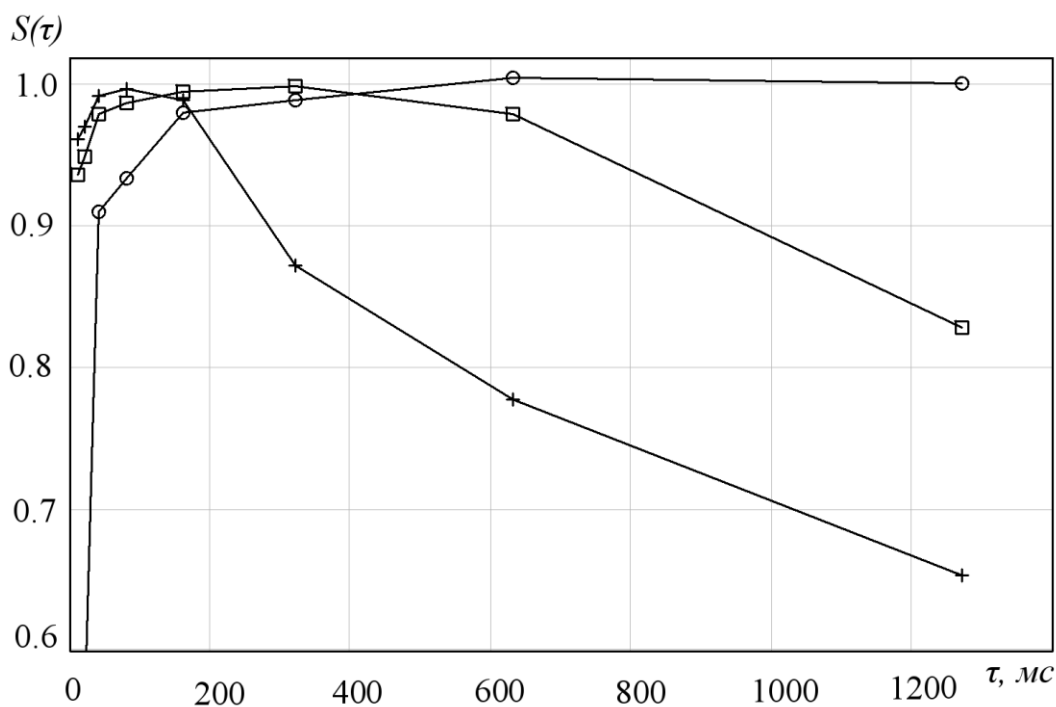
Из рис. 1 видно, что с приемлемой степенью искажения зарегистрированы спектры только с тремя наименьшими выдержками. В остальных случаях сигнал отягощен заметными на глаз нелинейными искажениями - он ограничен сверху и имеет сильно затянутый задний фронт. Это связано со спецификой накопления и считывания зарядов в приборах с зарядовой связью (blooming effect). Специфика накопления и считывания заряда детектора приводит также к заметной волнистости в насыщении при максимальных значениях сигнала.

Рассмотрим в качестве аналитического параметра площадь под кривой распределения. Поведение этого параметра от продолжительности экспозиции зависит от соблюдения закона взаимозаместимости яркости и выдержки для каждой

спектральной линии. Этот закон известен в фотохимии, как закон Бунзена-Роско [3], а в фотографической фотометрии, как закон Шварцшильда. В рассматриваемом нами случае, при его соблюдении площадь под кривой распределения яркости в линии при фиксированном общем времени измерения не должна зависеть от величины выдержки. Подразумевается, что с увеличением выдержки их количество пропорционально уменьшается, и наоборот.

При этом изменение времени выдержки должно быть равносильно такому же изменению освещенности в линии. В конце цикла измерения накопленные за каждую отдельную выдержку данные складываются в цифровом виде за общее время эксперимента. При линейной светосигнальной характеристике значения такого аналитического параметра для всех выдержек должны быть одинаковыми.

Для экспериментальной проверки выполнимости этого закона результаты фотометрирования делились на величину выдержки. Если построить график зависимости результатов деления от величины выдержки, то в случае соблюдения закона взаимозаменяемости получим горизонтальную прямую линию. В действительности линия никогда не бывает ни прямой, ни горизонтальной. Если все, полученные таким образом, значения для каждой спектральной линии пронормировать по их максимальному значению, то получим зависимость площади от выдержки  $S(\tau)$ , изображенную на рис. 2. Там, для примера, представлены результаты фотометрирования трех спектральных линий, интенсивности которых соотносятся, приблизительно, как 11 : 115 : 560.



**Рис. 2. Результаты вычисления площадей под кривыми распределения яркостей  $S(\tau)$ , в зависимости от выдержки в миллисекундах. Обозначения: спектральная линия с амплитудой 11 условных единиц -  $\circ\circ\circ$ , 115 условных единиц -  $\square\square\square$ , 560 условных единиц -  $+++$**

Из него следует, что для всех трех линий закон взаимозаменяемости нарушается при минимальных выдержках. При уменьшении выдержки величина накопленного сигнала стремится к нулю и, неизбежно, становится меньше шага квантования АЦП. Поэтому шаг квантования делают меньшим разброса значений, обусловленных шумами

считывания и нестабильностями плазменного образования. Как показывают наши измерения, при стабильных источниках в лабораторных условиях при малых выдержках необходимо применять АЦП с разрядностью более 12 разрядов или учитывать нелинейности системы регистрации.

А при больших выдержках этот закон начинает нарушаться из-за эффекта блуминга – тем раньше, чем мощней линия.

### **Выводы**

Анализ экспериментальных результатов позволяет сделать следующие выводы:

Основным ограничивающим фактором динамического диапазона в случае сильных сигналов является перегрузка цепей накопления и переноса фотоэлектрических зарядов структурами детектора (blooming effect). Основным препятствием для расширения динамического диапазона в сторону слабых сигналов является темновой ток, шумы считывания и шумы квантования аналого-цифрового преобразования.

Для ослабления влияния этих факторов на результаты анализа предлагается следующее: в процессе измерений осуществлять контроль нелинейностей трактов накопления и переноса заряда по выполнению принципа взаимозаменяемости яркости линий и выдержки.

Выбирать наименее подверженные к действию перегрузки аналитические параметры.

В случае больших сигналов предпочтительно использовать не аналитическое, а табличное представление аппаратной функции.

В случае слабых сигналов необходимо, чтобы шаг дискретизации аналого-цифрового преобразователя не превышал суммарный шум темнового тока и шумов считывания, которые определяются паспортными характеристиками фотоприемника.

### **Литература**

1. Егоров, В.А. Автоматизированный атомно-эмиссионный спектрометр / В.А. Егоров, С.А. Егоров // Наука та інновації. – Київ. Академперіодика. – Том.4. №2. – 2008, – С. 33-39.
2. Косарев, Е.Л. Методы обработки экспериментальных данных. / Е.Л. Косарев. – М. Физматлит, 2008. – 208с.
3. Гороховский, Ю.Н. Общая сенситометрия. Теория и практика / Ю.Н. Гороховский, Т.М. Левенберг. – М.: Искусство, 1963. – 302 с.