

УДК 53.083

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДЕТЕКТОРАМИ

Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Еленская Л. И., Синельников И. Е.  
Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
г. Харьков, Украина  
[yegorov@ire.kharkov.ua](mailto:yegorov@ire.kharkov.ua)

*В статье представлены результаты исследования некоторых характеристик темнового тока фотодетекторных линеек спектрометров в зависимости от температуры. Они свидетельствуют о возможности определения температуры фотодетекторов программными методами на основе получаемых при элементном анализе данных без переделки электротехнической части измерительной системы. Это позволяет компенсировать влияние мешающих факторов и повысить точность анализов в лабораторных и заводских условиях.*

**Ключевые слова:** атомно-эмиссионная спектроскопия, темновой ток, CCD детектор, температурные исследования.

### Введение, постановка задачи

Метод атомно-эмиссионного спектрального анализа является одним из самых распространенных и экспрессных методов определения элементного состава металлов и сплавов в металлургии и металлообработке. В Институте радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины г. Харьков (ИРЭ) разрабатывается и изготавливается аппаратура эмиссионного спектрального анализа вещества. В статье приводятся экспериментальные результаты температурных исследований фотодиодных детекторных линеек фирмы Toshiba, установленных в фотоэлектрической приставке SpectroMaster, разработки авторов статьи. Работа выполнялась в реальных цеховых условиях на ряде металлургических и металлообрабатывающих предприятий.

Назначение аппаратуры спектрального анализа состоит в измерении распределения спектральной мощности светового сигнала  $f(\lambda)$  как функции длины волны  $\lambda$ . В фокальной плоскости спектрографа эта функция отображается как зависимость  $f(x)$  от координаты  $x$ , направленной 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 пиксела с порядковым номером  $n$  за время экспозиции  $\tau$ :

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

где  $T$  — температура кристалла,  $\theta_n(T)$  - величина темнового тока, а  $Q_n$  – передаточная функция  $n$  – го пиксела фотодетекторной линейки, которая характеризует его чувствительность.

Согласно паспортным характеристикам CCD детектора изображений линей-

ной структуры фирмы TOSHIBA типа TCD1304AP [1] известно, что темновой ток детектора изменяется в 2 раза на каждые 7 градусов изменения температуры кристалла. Целью данной работы является измерение зависимости величины темнового тока CCD сенсоров от температуры в реальных условиях. Это нужно для определения допустимого диапазона рабочих температур и экспозиций при выработке практических рекомендаций для использования системы в условиях заводской лаборатории и цеха.

При закрытом оптическом входе спектрометра, второе слагаемое в правой части выражения (1) обращается в ноль и темновой ток каждого пиксела можно определять с достаточной для практических применений точностью. Если все измерения производятся при одной температуре, то постоянную составляющую  $\theta_n(T)$  можно исключить простым вычитанием из всех последующих измерений. Если же термостатирование отсутствует, то для исключения температурных влияний необходимо знать зависимость  $\theta_n(T)$  от температуры. Измерения температуры кристалла каждой микросхемы сопряжено с усложнением принципиальной и монтажной схемы установки. Чтобы избежать усложнений схем, в настоящей работе было проведено исследование возможности определения температуры кристалла по параметрам измеряемого сигнала, для решения проблемы на программном уровне.

### **Описание экспериментальной установки**

Экспериментальная установка представляет собой измерительную систему, состоящую из генератора плазмы, спектрографа и фотоэлектрического блока. Управление работой комплекса и обработка данных осуществляется компьютером со специализированным программным обеспечением. В качестве спектрографа используется ДФС-452 с незначительными усовершенствованиями. На место фотографической пластинки в спектрограф устанавливается фотоэлектрический блок, который описан в работе [2]. Отличительной особенностью этого блока есть наличие возможности измерения и регулировки температуры кристалла фотодетектора от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ .

Аппаратурная часть системы фотоэлектрической регистрации спектрометра спроектирована на базе приборов с зарядовой связью линейной структуры (ПЗС фотоприемников TCD1304AP), каждый из которых содержит 3648 фотодиодов, имеющих размеры 8 на 200 мкм. Каждый фотоприемник перекрывает 29 мм спектра в фокальной плоскости спектрографа, и для регистрации всего рабочего диапазона было установлено 9 сенсоров. Кроме того, в состав прибора входят схемы синхронизации и управления, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), интерфейсные схемы для связи с базовым компьютером.

Разрешающая способность регистратора зависит от соотношения размеров пиксела и полуширины спектральной линии [3]. Чем меньше это соотношение, тем выше разрешающая способность регистратора. Полуширина спектральной линии определяется аппаратной функцией дисперсионного блока, шириной входной щели, а также естественным уширением линии.

В нашем случае отношение размера пиксела к полуширине спектральной линии близко к единице. Такого разрешения достаточно для решения большинства задач практического спектрального анализа. Для более подробного изучения спектров нами разработан метод получения субпиксельного разрешения [4]. Динамический диапазон регистратора определяется отношением его собственных шумов к максимальному сигналу, регистрируемому в пределах линейного участка передаточной характеристики. Основными компонентами шума являются следующие: нестабильность темнового тока фотодиодов, шумы считывания и шумы квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Первые две компоненты шума определяются, в основном, паспортными характеристиками фотодетекторных линеек, а шумы АЦП зависят от его разрядности. При 12-тиразрядном АЦП, используемом в описываемом варианте аппаратуры, шумы квантования меньше 0,1%. Это на порядок меньше вклада двух других компонент, что позволяет накапливать сигнал многократным считыванием. При этом соотношение сигнал/шум растет пропорционально корню квадратному из числа считываний.

Кроме указанных источников погрешностей случайного характера, могут возникать и систематические ошибки при некорректном сглаживании результатов измерений. Такого рода ошибки, связанные с использованием прямоугольного ядра сглаживания, исследованы нами в работе [2]. Применение прямоугольного ядра сглаживания при неопределенном положении спектральной линии относительно пикселей детектора и неизвестной ее ширине может повлечь за собой потери точности анализа и/или ухудшить разрешающую способность. Для того, чтобы свести к приемлемому минимуму такие потери, необходимо контролировать температуру спектрометра с точностью до нескольких десятых градуса и с микронной точностью стабилизировать положение изображения спектра относительно пикселей детекторной линейки.

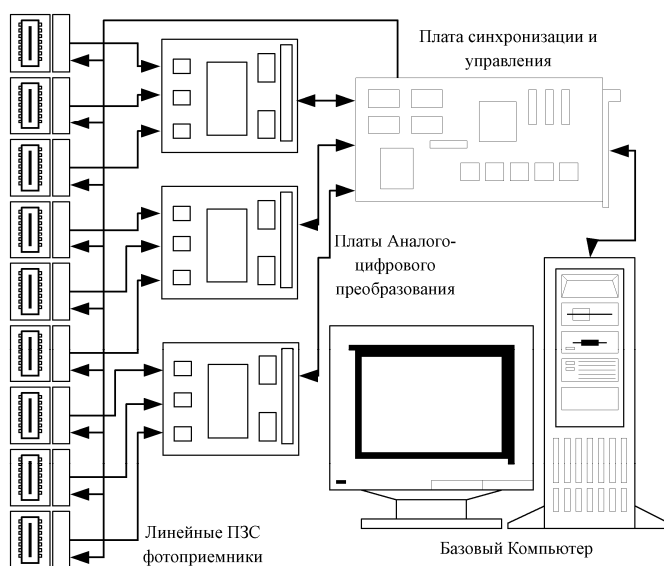


Рис. 1. Система фотоэлектрической регистрации

Структурная схема системы фотоэлектрической регистрации представлена на рис. 1. Аппаратурная часть комплекса состоит из следующих основных блоков: плат линейных ПЗС фотоприемников, плат аналого – цифровых преобразователей, платы синхронизации и управления, базового компьютера. Если все компоненты измерительной аппаратуры надежно закреплены, находятся в термостатируемом помещении и

не подвергаются случайным механическим воздействиям, то всегда есть возможность учесть темновой ток каждого пиксела. Но обычно в реальных заводских условиях температура непредсказуемо меняется в широких пределах, что может отразиться на конечных результатах анализов. Для компенсации этого явления важно знать температуру кристалла фотодетекторной линейки непосредственно во время проведения анализов. Интегральные характеристики неравномерности величины темновых токов линеек демонстрировали достаточно высокую стабильность, которая позволяет надежно определять температуру кристалла фотодетектора косвенно, без использования дополнительных датчиков, что весьма полезно для реализации в реальной аппаратуре.

В предлагаемой работе исследуется возможность проведения температурных измерений кристалла на основе данных, получаемых при фотометрировании спектров. Как уже отмечалось ранее, такой подход решает проблему на программном уровне и не требует вмешательства в электротехническую часть установки.

### Результаты измерений

Анализ темновых токов производился в диапазоне температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  при экспозициях от 0.035 до 16 секунд. В качестве примера на рис.2

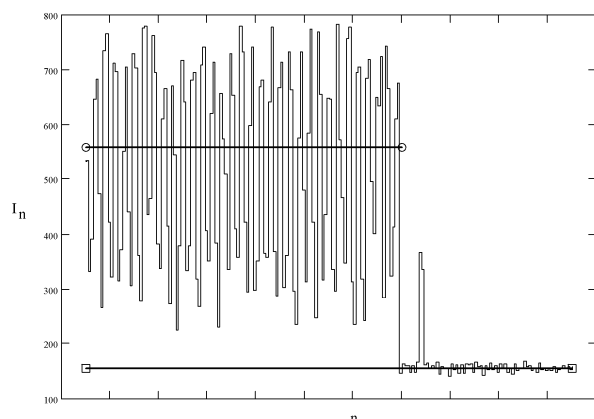


Рис. 2. Темновой ток на выходе детектора. Постоянная составляющая темнового тока — верхняя линия (○—○), аппаратный нуль — нижняя линия (□—□). На горизонтальной оси представлены номера пикселов

представлена зависимость темнового тока, выраженного в относительных единицах  $I_n$ , от номера пиксела  $n$  одной из линеек. На основе этих данных, изучалась точность определения температуры для исследуемых параметров  $P_i(T)$ . Анализировалось три параметра, т.е.  $1 \leq i \leq 3$ . В первом приближении неопределенность параметра  $\Delta P_i(T)$  связана с неопределенностью температуры  $\Delta T$  через производную следующим образом:

$$\Delta P_i = \frac{\partial P_i}{\partial T} \cdot \Delta T. \quad (2)$$

Измеренная зависимость  $P_i(T)$  позволяет нам вычислить значения производной при рабочих температурах и вариацию значений параметров как результат статистической обработки получаемых данных. Из (2) получим выражение для величины ошибки измерения температуры  $\Delta T$  по измеренному параметру:

$$\Delta T = \frac{\Delta P_i}{\frac{\partial P_i}{\partial T}}. \quad (3)$$

В качестве экспериментально измеряемых параметров использовались три следующие характеристики темнового тока фотодетекторов:

а) Параметр  $P_1(T)$ . Это усреднённая по многим отсчётам разница между оцифрованным сигналом линейки без засветки и аппаратным нулём, измеряемым холостыми циклами сразу после окончания поступления сигнала с линейки. На рис 3 этот параметр отображается разностью ординат двух горизонтальных линий. Верхняя линия представляет постоянную составляющую темнового тока линейки, а нижняя – уровень аппаратного нуля данной микросхемы.

б) Параметр  $P_2(T)$ . Он равен амплитуде периодической составляющей, обнаруженной в темновом токе сенсора. В преобразовании Фурье темнового тока (рис.3) четко прослеживается пик большой амплитуды. Эту гармоническую составляющую с периодом в четыре пиксела заметно и в координатном представлении на рис. 2. О происхождении этой составляющей мы можем только догадываться, т.к. нам достоверно не известен замысел разработчика микросхемы. Обычно, при рутинных спектральных измерениях, гармоническая составляющая не используется, она исключается в процессе математической обработки. В данной работе мы исследовали возможность использования ее для выполнения температурных измерений.

в) Параметр  $P_3(T)$ . Это усредненный по всем пикселям модуль остатка от вычитания двух соседних экспозиций. Если обозначить темновой ток  $n$ -го пиксела при  $k$ -ой экспозиции через  $I_{n,k}$ , то:

$$P_3(T) = \frac{1}{N} \sum_n |I_{n,k+1}(T) - I_{n,k}(T)|, \quad (4)$$

где  $N$  – общее количество пикселей.

Он содержит как пространственную, так и временную компоненту. Эргодность процедуры (4) мы не исследовали, т.к. она не имеет прямого отношения к предмету данной работы.

Были проведены измерения темнового сигнала при  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$  при разных экспозициях (от 0.035 до 16 секунд). На основании полученных данных строились зависимости перечисленных выше параметров от температуры. Некоторые из полученных графиков представлены на рисунках 4 - 7.

Рисунок 4 отражает изменение параметра  $P_1$  от температуры. При каждой температуре производилось по восемь измерений темнового тока. За счет случайных ошибок кружки на графике должны размываться, но, в силу высокой точности, это размытие при принятом масштабе, практически, не заметно.

Более наглядно неопределенность измерения температуры по параметру  $P_1$  для разных экспозиций, полученная по формуле (3), представлена на рис.5. Среднеквадратическая ошибка  $\Delta T$ , при этом методе измерения температуры в диапазоне от  $-20$  до  $30^{\circ}\text{C}$  для экспозиций от 0.5 секунд до 4-х секунд, представлена на рис. 5 и составила около  $0.1^{\circ}\text{C}$  для положительных температур. При отрицательных температурах темновые помехи значительно меньше шумов считывания, что обуславливает увеличение погрешностей температурных измерений. Но даже большие ошибки определения отрицательных температур мало

сказываются на конечных результатах т.к. в этом температурном диапазоне решающая роль принадлежит шумам считывания.

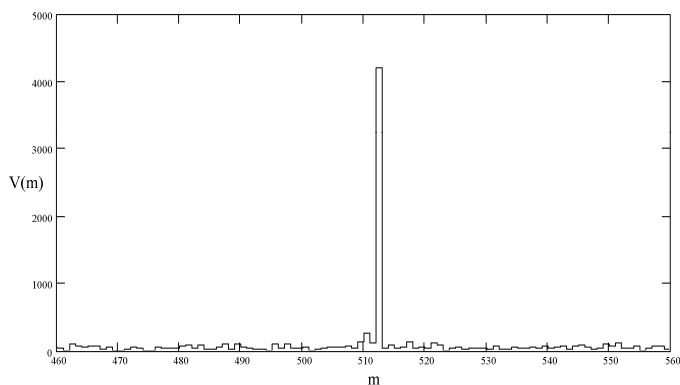


Рис. 3. Преобразование Фурье темнового тока. По вертикали – модуль преобразования Фурье, по горизонтали – номера гармоник

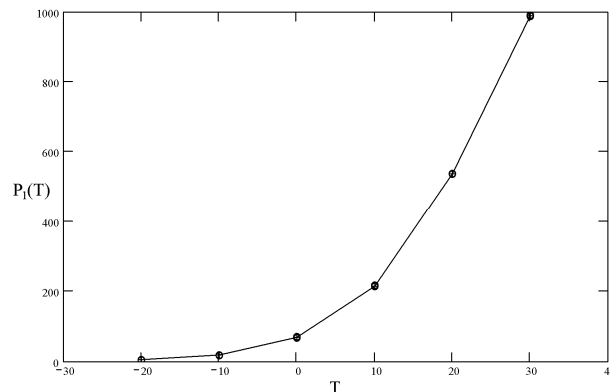


Рис. 4. Зависимость параметра  $P_1$  от температуры. Экспозиция 0,5 с

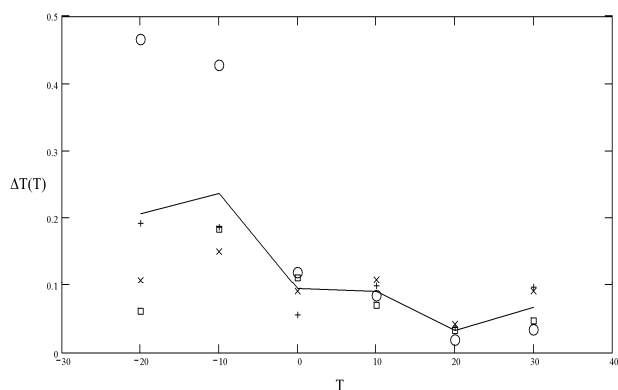


Рис. 5. Зависимость величины ошибки  $\Delta T$  от температуры кристалла при разных экспозициях. Экспозиция:  $\circ$  – 0,5 с, + - 1 с,  $\times$  - 2 с,  $\square$  – 4 с, — — - среднее по всем экспозициям

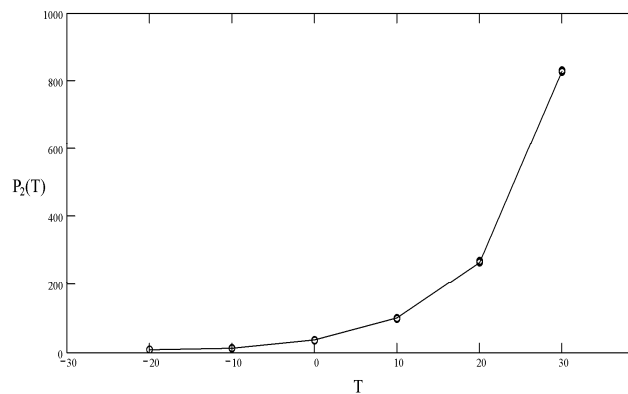


Рис. 6. Зависимость параметра  $P_2$  от температуры. Экспозиция 0,5 с

На рис. 6 представлен ход зависимости параметра  $P_2$  от температуры при экспозиции 0,5 секунды. Так же как  $P_1(T)$ , параметр  $P_2(T)$  представляет собой показательную функцию с тем же основанием. По амплитудным и точностным характеристикам они тоже почти не отличаются. На рис. 7 представлена температурная зависимость для параметра  $P_3(T)$ . Точность измерения этого параметра по сравнению с двумя предыдущими значительно ниже, что видно по разбросу данных восьми измерений. Кроме того, максимальная крутизна экспериментального графика в районе от  $10^\circ\text{C}$  до  $20^\circ\text{C}$  составляет, в лучшем случае, всего несколько десятых долей единицы на один градус. Из этого следует, что точность определения температуры с использованием параметра  $P_3(T)$  будет порядка  $\pm 10^\circ\text{C}$ , что значительно хуже, чем по параметрам  $P_1(T)$  и  $P_2(T)$ .

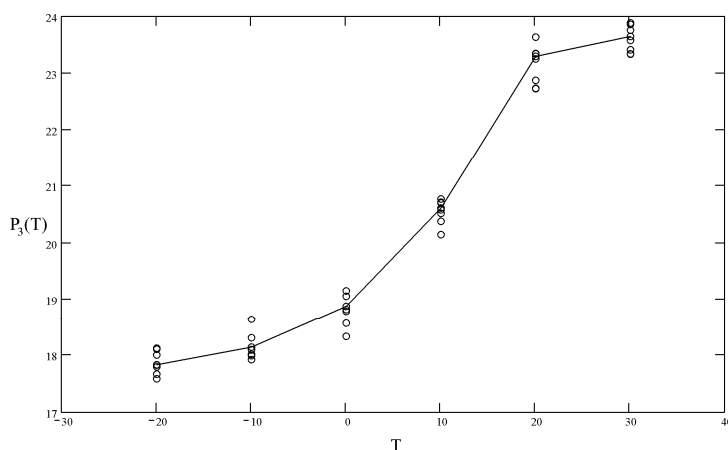


Рис. 7. Залежність шумової складової темного току від температури. Восемь експозицій по 0,5 с

### Выводы

Анализ экспериментального материала свидетельствует, что при выборе оптимального метода измерений температуры необходимо учитывать рабочий температурный диапазон и величину экспозиции. Для разных сочетаний температуры и экспозиции желательно применять разные методы. Наиболее широкий диапазон применения имеет параметр  $P_1(T)$  - превышение темного тока над ап-

паратным нулем.

В связи с тем, что, как упоминалось ранее, работа в заводских условиях сопровождается воздействием температурных и механических факторов, положение спектра относительно детекторных линеек меняется. В определенном диапазоне значений параметров фотометрирования это может привести к искажению результатов. На основе анализа темного тока детектора был выявлен допустимый диапазон рабочих температур и экспозиций фотометрирования спектров, что позволяет конкретизировать требования к условиям эксплуатации оборудования в условиях цеха и заводской лаборатории.

Предлагаемая методика опробована на практике при внедрении нашей аппаратуры на заводе Азовмаш и комбинате им. Ильича (г. Мариуполь), на предприятии ООО «ЮГАМЕТ» (г. Луганск), а также на ряде других предприятий и научно-исследовательских институтов Харькова, Полтавы, Черкасс.

### Литература

1. TOSHIBA CCD LINEAR IMAGE SENSOR TCD1304AP Datasheet.
2. Егоров В. А. Автоматизированный атомно-эмиссионный спектрометр / В. А. Егоров, С. А. Егоров // Київ: Академперіодика. Наука та інновації. – 2008. – Т. 4. – № 2. – С.33-39.
3. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. – М.: Наука, 1979 – 480 с.
4. Yegorov A. Subpixel detection in the registration of spectrum images by photodiode structures / A. Yegorov, V. Yegorov, S. Yegorov // Харьков: Радиофизика и радиоастрономия – 2009. - Т.14. - № 1. – С. 77-83.
5. Егоров А. Д. Фотометрирование эмиссионных оптических спектров фотодиодными линейками / А. Д. Егоров, В. А. Егоров, С. А. Егоров, Е. В. Здор // Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. Радиофизика и электроника – 2002. – Том.7, № 2. – С. 422-425.

Надійшла до редакції  
18 червня 2014 року

© Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А., Еленская Л. И., Синельников И. Е., 2014