

## МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ

© 2012 г. А. П. Демин; Ю. П. Чугунов

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: progipo@tnpko.ru

Проведены измерения интенсивностей и длин волн спектральных линий линейчатых спектров спектральным прибором с многоэлементными линейными фотоприемниками с различной шириной светочувствительного элемента. Показано, что погрешность измерений уменьшается при определенном соотношении ширины светочувствительного элемента и полуширины аппаратной функции спектрального прибора.

**Ключевые слова:** многоэлементный фотоприемник, спектральная линия, полуширина аппаратной функции, аппроксимация, погрешность.

Коды OCIS: 300. 2140, 300. 62010.

Поступила в редакцию 19.05.2011.

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования влияния ширины светочувствительного элемента линейного многоэлементного фотоприемника (ФП) на погрешность измерений интенсивности и длины волны спектральных линий линейчатых спектров.

Обзор современных спектральных приборов ведущих мировых производителей (Perkin Elmer, Shimadzu, Ocean Optics, Horiba Jobin Yvon Inc., Spectro A.I. GmbH, Applied Research Laboratories, LECO), а также российских предприятий (ВМК-Оптоэлектроника, ЗАО “Спектральная лаборатория”, ОКБ “Спектр”, ООО “МОРС”) показывает, что большая часть номенклатуры выпускаемых изделий оснащена многоэлементными ФП. Такие приемники совмещают положительные свойства фотографических пластинок, позволяя одновременно регистрировать широкий спектральный диапазон, с преимуществами фотоэлектрической регистрации – чувствительностью, точностью и оперативностью. Системы регистрации на основе многоэлементных ФП позволяют создавать приборы с полной автоматизацией управления прибором, процесса сбора и обработки информации.

Однако их применение вносит в спектрофотометрические измерения погрешности, обусловленные дискретностью светочувствительных элементов, что снижает предел обнаруже-

ния, точность и достоверность спектрального анализа. Это особенно важно при проведении атомного эмиссионного и абсорбционного спектрального анализов, для которых необходимо измерять интенсивность и положение (длину волны) отдельных спектральных линий линейчатого спектра.

Условия выбора ширины светочувствительного элемента линейного многоэлементного ФП (которые полностью определяют контур спектральной линии в соответствии с теоремой Котельникова [1]), приведенные в работе [2], задаются соотношением

$$\operatorname{erf} \left[ \sqrt{2 \ln \frac{2Da\sqrt{\ln 2}}{\Delta\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(a\sqrt{\ln 2}/\Delta)}} \right] - \left[ \frac{\Delta\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(a\sqrt{\ln 2}/\Delta)}{2Da\sqrt{\ln 2}} \right]^2 \times \sqrt{\frac{8}{\pi} \ln \frac{2Da\sqrt{\ln 2}}{\Delta\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(a\sqrt{\ln 2}/\Delta)}} = \operatorname{erf} \left( \frac{\Delta\pi}{2a\sqrt{2 \ln 2}} \right), \quad (1)$$

где

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt - \text{функция ошибок,}$$

$D$  – динамический диапазон светочувствительного элемента ФП,

$\Delta$  – полуширина аппаратной функции (АФ) спектрального прибора,

$a$  – ширина светочувствительного элемента ФП вдоль оси дисперсии спектрального прибора.

Экспериментальная проверка влияния ширины светочувствительного элемента линейного многоэлементного ФП на погрешность измерения длин волн и интенсивностей спектральных линий проводилась на спектрографе ДФС-458 с известной полушириной АФ, равной 20 мкм при ширине входной щели 15 мкм для спектрального диапазона длин волн 2300–3500 Å [3]. В качестве источника излучения использовалась высокочастотная безэлектродная лампа ВСБ-2, заполненная парами ртути, с блоком питания ППБЛ-3Б.

Требуемое значение полуширины АФ устанавливалось путем изменения ширины входной щели спектрографа. Для контроля полуширины АФ спектрографа разработана специальная программа на основе алгоритмов, предложенных в работах [4, 5], позволяющая проводить измерение полуширины контура произвольно выбранной спектральной линии в фокальной плоскости спектрографа. Поскольку полуширина контуров (естественная) спектральных линий применяемого источника излучения значительно меньше аппаратного (приборного) контура спектрографа ДФС-458, то в фокальной плоскости спектрографа, как показано в [6], спектральная линия повторяет аппаратный контур спектрографа. На этом и основывается измерение полуширины АФ (аппаратного контура) спектрального прибора.

Главное окно программы для измерения полуширины АФ приведено на рис. 1.

В основу алгоритмов измерения характеристик контуров спектральных линий, разработанных в [4, 5], заложена “симметрично-ступенчатая” аппроксимация их контуров, обеспечивающая меньшую погрешность по сравнению с другими способами аппроксимации.

Аппроксимация аппаратного контура “симметрично-ступенчатой” функцией ( $b_c = d_c$ ), показанная на рис. 2 пунктиром, задается выражением

$$A(x) = \begin{cases} b_c & \text{при } (N-2)a < x < (N-1)a, \\ c_c & \text{при } (N-1)a < x < Na, \\ d_c & \text{при } Na < x < (N+1)a, \end{cases} \quad (2)$$

где  $N$  – номер светочувствительного элемента ФП,  $b_c$ ,  $c_c$ ,  $d_c$  – интенсивности сигналов при смещении спектральной линии на  $\Delta x$ .

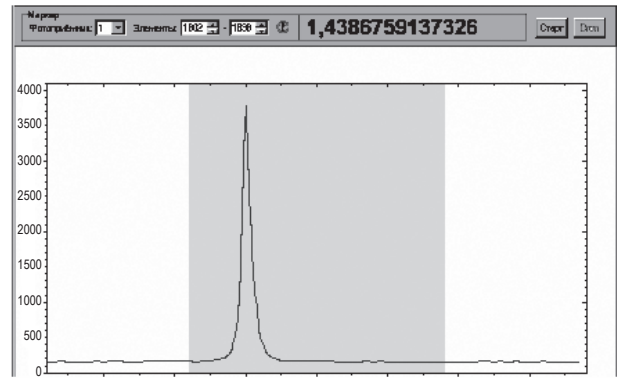


Рис. 1. Главное окно программы расчета полуширины аппаратной функции.

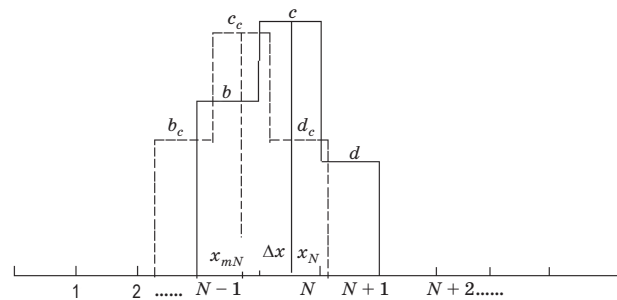


Рис. 2. Симметрично-ступенчатая аппроксимация контура аппаратной функции.

При смещении спектральной линии на  $\Delta x$  интенсивности сигналов  $b$ ,  $c$  и  $d$ , регистрируемых светочувствительными элементами ФП  $N-1$ ,  $N$  и  $N+1$ , будут равны  $b_c$ ,  $c_c$  и  $d_c$  соответственно. Положение спектральной линии рассчитывается по формулам [5]

$$l_{mN} = l_N + \Delta x = \begin{cases} l_N + a \frac{(c + 2d - 2b) - \sqrt{c^2 + 4b^2 - 4bd}}{2(c + d)} & \text{при } d \geq b, \\ l_N - a \frac{(c + 2b - 2d) - \sqrt{c^2 + 4d^2 - 4bd}}{2(c + b)} & \text{при } b > d, \\ l_N & \text{при равенстве сигналов двух соседних элементов спектральной линии,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $l_N$  – расстояние между начальным элементом ФП и элементом ФП, регистрирующим максимальное значение интенсивности спектральной линии;

$l_{mN}$  – расстояние между начальным элементом ФП и положением максимума контура спектральной линии,

$\Delta x$  – смещение спектральной линии до выравнивания сигналов  $b_c = d_c$ .

Таким образом, по сигналам  $b$ ,  $c$  и  $d$  со светочувствительных элементов ФП интенсивность спектральной линии определится как

$$\begin{aligned} c_c &= \frac{ac}{a - \Delta x} - \frac{ab\Delta x}{(a - \Delta x)^2} \text{ при } b \geq d, \\ c_c &= \frac{ac}{a - \Delta x} - \frac{ad\Delta x}{(a - \Delta x)^2} \text{ при } d > b. \end{aligned} \quad (4)$$

Полуширина АФ  $\Delta$  определится как

$$\begin{aligned} \Delta &= a + a \frac{(2b_c - c_c)}{2b_c} \text{ при } b_c = d_c \geq 0,5c_c, \\ \Delta &= a - a \frac{(c_c - 2b_c)}{2c_c} \text{ при } b_c = d_c < 0,5c_c. \end{aligned} \quad (5)$$

Для исследования погрешности измерения длин волн были выбраны близко расположенные спектральные линии ртути с табличными [7] значениями длин волн 2655,13, 2653,68 и 2652,04 Å. Регистрация спектральных линий проводилась с помощью многоканальной системы регистрации оптического излучения [8] и использованием модификаций многоканального измерительного регистратора спектров [9, 10] с ПЗС-фотоприемниками ILX554B и TCD1304AP. Положение спектральных линий для измерения их длин волн рассчитывалось с помощью выражения (3). По двум парам спектральных линий с длинами волн 2655,13, 2653,68 и 2655,13, 2652,04 Å рассчитывалось среднее значение обратной линейной дисперсии. Спектральная линия с длиной волны 2653,68 Å использовалась в качестве реперной для измерения длины волны спектральной линии с табличным значением 2655,13 Å с помощью выражения

$$\lambda_x = \lambda_1 \pm (l_{mX} - l_{mR})p, \quad (6)$$

где  $\lambda_1$  – длина волны реперной спектральной линии,

$l_{mX}$  – расстояние между начальным элементом ФП и положением максимума контура измеряемой спектральной линии,

$l_{mR}$  – расстояние между начальным элементом ФП и положением максимума контура интенсивности реперной спектральной линии,

$p$  – среднее значение обратной линейной дисперсии спектрального прибора.

Спектральные линии регистрировались при времени накопления сигнала 500 мс, достаточном, чтобы их интенсивность значительно пре-

вышла фоновый сигнал, и числе накоплений, равном 100.

Полуширина АФ для ПЗС-фотоприемника ILX554B с шириной элемента 14 мкм и динамическим диапазоном 330, рассчитанная по формуле (1), равна 32 мкм; для ПЗС-фотоприемника TCD1304AP с шириной элемента 8 мкм и динамическим диапазоном 300–20 мкм; для ПЗС-фотоприемника ФППЗ-7л с шириной элемента 26 мкм и динамическим диапазоном 250–63 мкм.

Проведено по 50 измерений длины волны спектральной линии 2655,13 Å тремя типами ФП при ширине входной щели спектрографа 15 мкм, т. е. при полуширине АФ  $\Delta = 20$  мкм.

После этого путем увеличения ширины входной щели спектрографа устанавливалась полуширина АФ спектрографа  $\Delta = 32$  мкм. По соотношению (1) для такой полуширины АФ минимально необходимая ширина элемента равна 14 мкм для ПФ с динамическим диапазоном 330, что соответствует ФП ILX554B. Проведено 50 измерений длины волны спектральной линии 2655,13 Å с помощью фотоприемника ILX554B. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что разброс измеренных значений длины волны спектральной линии 2655,13 Å для фотоприемника TCD1304AP минимален и равен 0,006 Å, для фотоприемника ILX554B – 0,01 Å и для фотоприемника ФППЗ-7л – 0,18 Å. При увеличении полуширины АФ до 32 мкм разброс измеренных значений длины волны спектральной линии 2655,13 Å для фотоприемника ILX554B уменьшился до 0,007 Å.

Абсолютная погрешность измерения длины волны при полуширине АФ 20 мкм составила 0,098, 0,0042 и 0,0049 Å для фотоприемников ФППЗ-7л, TCD1304AP и ILX554B соответственно. При увеличении полуширины АФ до 32 мкм абсолютная погрешность измерения длины волны спектральной линии 2655,13 Å для фотоприемника ILX554B уменьшилась до 0,0044 Å.

Разброс значений и абсолютные погрешности измерения длины волны изменяются при регистрации спектральных линий фотоприемником в зависимости от соотношения ширины светочувствительного элемента, динамического диапазона ФП и полуширины АФ в соответствии с теоретически обоснованным выражением (1). При этом они практически не зависят от типа ФП.

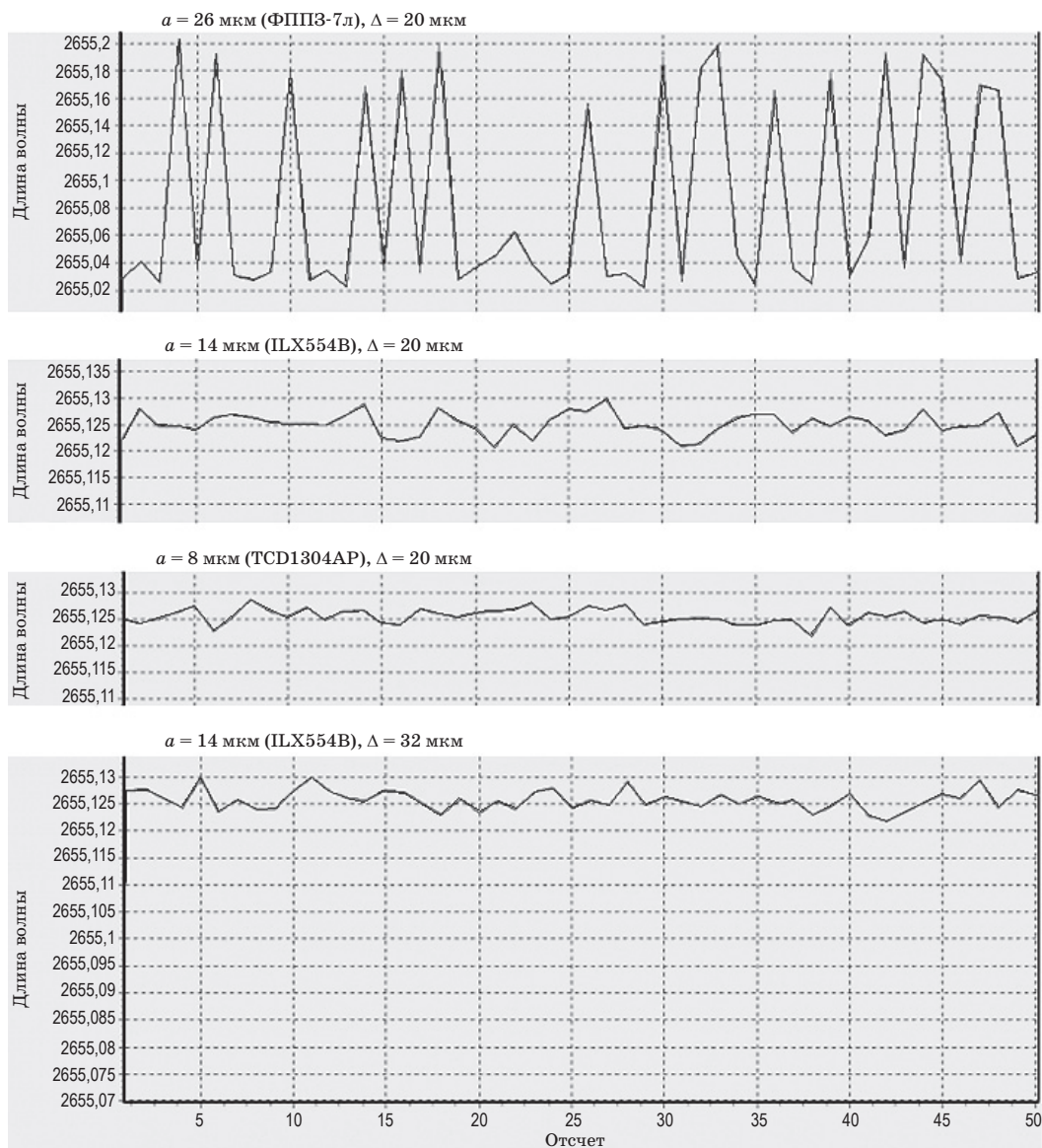


Рис. 3. Результаты измерений длины волны спектральной линии.

Расчет среднего квадратического отклонения

Номер измерения	Интенсивность спектральной линии, измеренная фотоприемниками, мВ			
	TCD1304AP $\Delta = 20$ мкм	ILX554B $\Delta = 20$ мкм	ILX554B $\Delta = 32$ мкм	ФППЗ-7л $\Delta = 20$ мкм
1	1172,3	1840,2	2206,2	3408,8
2	1171,7	1844,1	2209,9	3407,9
3	1160,1	1828,0	2228,2	3376,4
4	1156,3	1827,9	2216,9	3369,4
5	1155,9	1820,1	2212,7	3371,3
6	1151,5	1816,0	2210,8	3358,9
7	1157,2	1816,7	2222,7	3356,4
8	1143,0	1799,5	2233,3	3328,3
9	1143,2	1808,7	2230,3	3337,6
10	1149,3	1810,4	2227,4	3347,6
Среднее значение	1156,1	1821,2	2219,8	3366,3
Среднее квадратическое отклонение	1,06	1,47	1,0	2,78

Аналогично измерялась и рассчитывалась по формулам (4) интенсивность спектральной линии 2655,13 Å. Проводилось по 10 измерений и рассчитывалось среднее квадратическое отклонение по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (J_i - \bar{J})^2}{n(n-1)}}, \quad (7)$$

где  $i$  – номер измерения,  $J_i$  – интенсивность  $i$ -го измерения спектральной линии,  $n$  – число измерений ( $n = 10$ ),  $\bar{J}$  – среднее значение интенсивности спектральной линии  $n$  измерений.

Результаты представлены в таблице, откуда видно, что среднее квадратическое отклонение

измерения интенсивности спектральной линии также изменяется при выборе ширины светочувствительного элемента, динамического диапазона ФП и полуширины АФ в соответствии с теоретически обоснованным выражением (1).

### Заключение

Показано, что подбор многоэлементного фотоприемника с помощью соотношения (1) позволит оптимизировать характеристики оптико-электронного спектрального прибора с многоэлементной фотоэлектрической регистрацией линейчатых спектров за счет уменьшения погрешности измерений интенсивностей и длин волн спектральных линий.

\* \* \* \* \*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Госэнергоиздат, 1956. С. 94.
2. Демин А.П., Нагулин Ю.С. Выбор ширины элемента многоэлементного линейного фотоприемника для регистрации линейчатых спектров // ОМП. 1990. № 9. С. 36–38.
3. Павлычева Н.К., Кит И.Е. Спектрограф для спектрального анализа в геологии // ОМП. 1988. № 6. С. 27–29.
4. Демин А.П., Султанбеков Ф.Ф. Способ определения длин волн спектральных линий // А. с. № 1603202. Бюл. изобр. 1990. № 40. С. 17.
5. Демин А.П., Султанбеков Ф.Ф., Яндуганова О.Б. Методы определения длины волны спектральных линий, регистрируемых многоэлементным фотоприемником // Оптический журнал. 1992. № 3. С. 60–63.
6. Нагибина И.М., Михайловский Ю.К. Фотографические и фотоэлектрические спектральные приборы и техника эмиссионной спектроскопии. Л.: Машиностроение, 1981. С. 9–29.
7. Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Шнейдер Е.Я. Таблицы спектральных линий. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. С. 420.
8. Демин А.П. Многоканальная система регистрации оптического излучения с компенсацией темнового шума // ПТЭ. 1988. № 6. С. 150–154.
9. Балоев В.А., Демин А.П., Пеплов А.А., Филиппов В.Л. Многоканальный измерительный регистратор спектров – МИРС // Сб. тез. докл. XVII Уральской конфер. по спектроскопии. Екатеринбург, 2005. С. 177.
10. Многоканальный измерительный регистратор спектров (МИРС). Технические условия АД2.850.142.ТУ.