

# Обзор перспектив развития портативной спектрофотометрии

П. Д. Михайлова, А. А. Алиферко, Я. М. Маюнов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
polina.delitzsch@gmail.com

**Аннотация.** Спектрофотометрия довольно распространенный метод для исследования растворов и твердых веществ, который основывается на изучении спектров поглощения от ультрафиолетового до инфракрасного областей спектра. Разработка портативной спектрофотометрии необходима для упрощенного и более наглядного метода исследования. В данной работе рассмотрены основы, тенденции развития портативной спектрофотометрии. Представление отличительных особенностей, недостатков и преимуществ уже имеющегося данного вида оборудования, а также анализ сфер применения спектрофотометров.

**Ключевые слова:** спектрофотометрия, неинвазивные методы исследования, портативная электроника, портативная спектрофотометрия

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для быстрого и доступного анализа растворов требуются новые устройства. Это, наряду с недавним развитием технологий, способствовало значительному развитию портативных медицинских инструментов. Портативные спектрофотометры можно определить как устройства, которые были разработаны, чтобы быть легкими и достаточно маленькими, а также потребляли не так много энергии, как стационарные.

Портативное оборудование стало сегодня обширной и растущей техникой, которая привела к потенциальным преимуществам, включая большую рентабельность, простоту в использовании и экологичность. Кроме того, универсальность и возможности применения в различных областях делают портативные устройства перспективной альтернативой традиционному лабораторному оборудованию в самых разных случаях. Это отражено в увеличении количества статей по этой теме. Хотя за последние годы использование портативных приборов в нескольких научных областях увеличилось, необходимы новые знания и сопоставление с их стационарными эквивалентами.

Спектрофотометр – это прибор, который измеряет количество фотонов (интенсивность света), поглощенных после прохождения через раствор пробы. С помощью спектрофотометра можно также определить количество известного химического вещества (концентрацию) путем измерения интенсивности обнаруженного света из-за чего крайне востребованы в медицине.

## II. СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ

Спектрофотометр основан на фотометрическом методе, согласно которому при прохождении луча падающего света с начальной интенсивностью через раствор происходит поглощение и рассеивание части падающего света. В основе работы спектрофотометра лежит закон Бугера–Ламберта–Бера (1), где  $C$  – концентрация поглощающего вещества,  $\varepsilon(\lambda)$  – молекулярный коэффициент поглощения,  $l$  – толщина слоя поглощающей среды:

$$I(\lambda) = I_0 * e^{-Cl\varepsilon(\lambda)} \quad (1)$$

Наиболее часто в различных исследованиях используется ультрафиолетовая (УФ) методика исследования с диапазоном длин волн от 200 до 400 нм, видимая спектрометрия – от 400 до 760 нм и инфракрасная (ИК) с диапазоном длин волн 2,5–15 мкм области волнового спектра.

Основная функция любого спектрометра состоит в том, чтобы принимать свет, разбивать его на спектральные компоненты излучения для последующего оцифровывания сигнала как функции интенсивности излучения длины волны и регистрации полученных данных для последующей обработки. В зависимости от типа детекторов могут быть использованы различные конструкции спектрометров.

В случае использования фотодетектора применяется монохроматор для получения излучения необходимой длины волны. Схема данного спектрометра представлена на рис. 1.

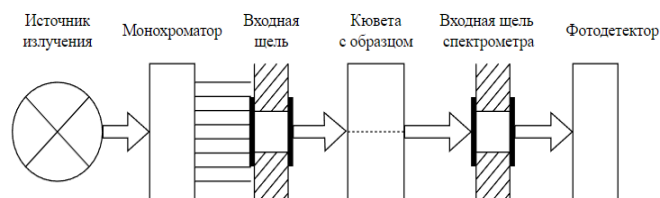


Рис. 1. Блок-схема спектрофотометра с фотодетектором

На первом этапе получения спектра свет направляется в монохроматор, где происходит получение спектра источника излучения для последующего выделения необходимого света определенной длины волны через входную щель, которая представляет собой узкую апертуру. Щель

виньетировать свет, попадающий на исследуемый образец или спектрометр.

На следующем этапе свет проходит через исследуемый образец, где и поглощается и рассеивается часть излучения, в зависимости от физико-химических свойств кюветы с исследуемым образцом. Далее, непоглощенный свет проходит через входную щель спектрометра и попадает на фотодетектор, при помощи которого фотоны преобразуются в электроны.

В случае использования ПЗС детекторов используется полихроматор для получения спектра непоглощенного света. Схема данного спектрометра представлена на рис. 2.

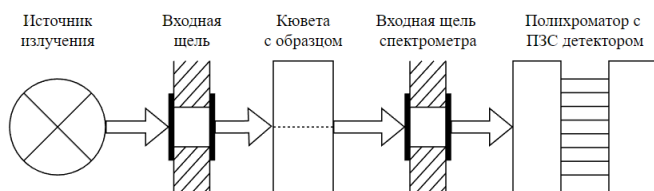


Рис. 2. Блок-схема спектрометра с ПЗС детектором

На первом этапе данного процесса свет направляется в спектрометр через входную щель, которая представляет собой узкую апертуру. Щель виньетировать свет, попадающий на исследуемый образец или спектрометр.

На следующем этапе свет проходит через исследуемый образец, где поглощается и рассеивается часть излучения, в зависимости от физико-химических свойств кюветы с исследуемым образцом. Далее, непоглощенный свет проходит через входную щель спектрометра и коллимируется в зависимости от оптической схемы спектрометра.

В схеме Черни–Тернера используются два вогнутых зеркала и дифракционная решетка, при помощи которых происходит разложение непоглощенного света на спектр [1].

В схеме с вогнутым голографическим зеркалом используется зеркало со штрихованной решеткой, благодаря чему происходит преломление и разложение непоглощенного света на спектр [2].

Как только свет попадает на детектор, фотоны преобразуются в электроны. Детектор может быть выполнен в виде фотодиода, ПЗС детекторы и др. Полученный электрический сигнал оцифровывается для дальнейшего анализа.

В последнее время широкое распространение получили ПЗС детекторы, состоящие из набора фотодетекторов (пикселей) малого размера. На основе количества пикселей в детекторе и линейной дисперсии дифракционной решетки программное обеспечение преобразует сигнал для создания калибровки, которая позволяет отображать данные как функцию длины волны в заданном спектральном диапазоне. Эти данные впоследствии могут использоваться и обрабатываться для многих специализированных приложений.

### III. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СПЕКТРОФОТОМЕТРОВ

Стационарные спектрофотометры зарекомендовали себя в медицине и фармации для исследований липидов, бактериологии, крови, тканей, для спектрального анализа, определения наличия определенных веществ в биологических жидкостях. Они различаются по принципу действия, которые в свою очередь применяются для различных видов исследований. Точность анализа делает стационарные спектрофотометры преимущественным типом для анализа, однако габариты установок вынуждают развивать эргономичный аспект данной области исследований. Приведем в пример стационарный спектрофотометр «Экохим ПЭ-5400УФ», который предназначен для измерения коэффициента пропускания и оптической плотности жидкостей с целью определения концентрации растворенных в них компонентов. Основные характеристики приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКОХИМ ПЭ-5400УФ

№	Характеристики	Экохим ПЭ-5400УФ
1	Длина, мм	465
2	Ширина, мм	395
3	Высота, мм	235
4	Вес, кг	12,5
5	Кюветное отделение	35
6	Напряжение питания, В\Гц	фотодиод
7	Спектральный диапазон, нм	190–1000
8	Выделяемый спектральный интервал, нм	4

Увеличенное кюветное отделение позволяет устанавливать до 4 кювет шириной 24 мм и длиной до 100 мм; программная установка длины волны облегчает работу. В данной модели присутствует режим количественного анализа с построением регулировок по стандартным образцам и вводимым коэффициентам и сохранение в памяти прибора до 200 групп данных и до 200 градуировочных кривых. В комплекте с прибором поставляется программное обеспечение для ПК, включающее 3 программы: количественный анализ, кинетика, ввод данных в Excel. [3]

Спектрофотометр УФ-1100 однолучевой с автоматической установкой длины волны, предназначен для различных анализов в лабораториях. Существует несколько режимов работы фотометрический и количественный, с использованием, которых можно определить оптическую плотность, коэффициент пропускания и рассчитать концентрацию по коэффициенту. [4] В табл. 2 приведены характеристики аналогично предыдущим примерам.

ТАБЛИЦА II. ХАРАКТЕРИСТИКИ УФ-1100

№	Характеристики	УФ-1100
1	Длина, мм	450
2	Ширина, мм	360
3	Высота, мм	160
4	Вес, кг	9
5	Кюветное отделение	3 шт
6	Фотоприемник	фотодиод
7	Спектральный диапазон, нм	200-1050
8	Выделяемый спектральный интервал, нм	5

Такие приборы, и подобные им, громоздки, а также требуют больших энергозатрат. Также стоит учитывать наличие механических элементов, свойственных однолучевым спектрометрам, которые понижают надежность изделия. Эти недостатки препятствуют использованию традиционных лабораторных аналитических методов в отдаленных регионах и в случаях, когда требуются аналитические данные в режиме реального времени. Спрос на быстрые и недорогие аналитические методы для использования в полевых условиях был мотивирован растущим в последние годы интересом к полевой аналитической химии, особенно в области мониторинга окружающей среды и управления производственными процессами. [5]

На данный момент портативная спектрофотометрия только начинает развиваться в медицине. Однако существуют спектрофотометры NS810, предназначенные для анализа лакокрасочных материалов, использующие ПЗС детекторы в качестве приемника излучения [6]. В табл. 3 приведены характеристики аналогично предыдущим примерам.

ТАБЛИЦА III. ХАРАКТЕРИСТИКИ NS810

№	Характеристики	NS810
1	Длина, мм	90
2	Ширина, мм	77
3	Высота, мм	230
4	Вес, кг	0,6
5	Кюветное отделение	отсутствует
6	Фотоприемник	Кремниевая фотодиодная матрица
7	Спектральный диапазон, нм	400-700
8	Выделяемый спектральный интервал, нм	5

Данное устройство не имеет кюветного отделения, так как для проведения исследования с помощью кювет необходимо дополнительное оборудование со специализированными кюветами.

#### IV. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Рассмотрение и анализ вышеперечисленных существующих устройств позволяют предложить собственную разработку портативного спектрофотометра. За основу взят модуль C12880, использующий вогнутое голографическое зеркало. Данное решение позволяет отказаться от механических систем в конструкции изделия. С характеристиками указанными в табл. 4. [7]

ТАБЛИЦА IV. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

№	Характеристики	Концепт
1	Длина, мм	50
2	Ширина, мм	50
3	Высота, мм	80
4	Вес, кг	0,4
5	Кюветное отделение	Одно отделение 1x1x1 см
6	Фотоприемник	Кремниевая фотодиодная матрица
7	Спектральный диапазон, нм	340-850
8	Выделяемый спектральный интервал, нм	12

Схема предлагаемого нами прибора изображена на рис. 3.

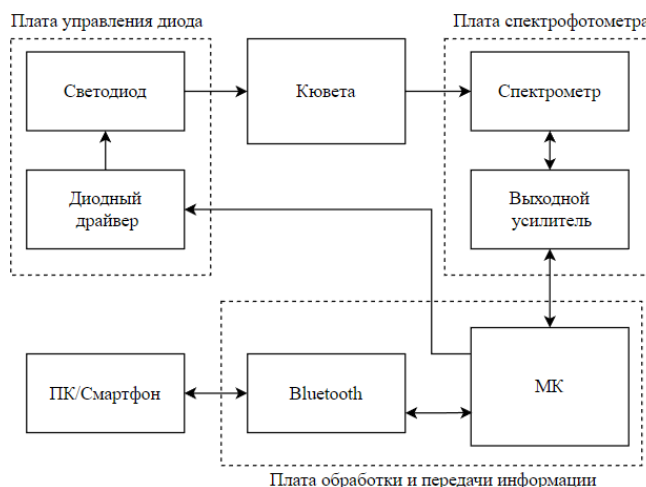


Рис. 3. Блок-схема спектрофотометра

В предложенном спектрофотометре предусмотрено ПО для смартфона с функциями анализа и сохранения данных, что в свою очередь поспособствует упрощению использования прибора.

Также стоит отметить довольно низкую предполагаемую стоимость, полученную за счет упрощения конструкции, относительно используемых устройств.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время значительно продвинулась миниатюризация спектрометров.

Однако уменьшение размера не должно сопровождаться ухудшением характеристик измерения, а портативные приборы окажут реальное влияние на качество и контроль процесса.

Был проведен анализ существующих спектрофотометров и оценка их сфер использования, и особенностей. Исходя из обработанной информации их характеристик, была предложена концепция для дальнейшей реализации спектрофотометрии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Shi W. и др. The Evaluation of Spectral Resolution in the Optical Design of a Czerny-Turner Spectrometer // Photonics. 2022. Т. 9. № 10. С. 678.
- [2] Muslimov E. Optical Schemes of Spectrographs with Transmission Concave Holographic Gratings // CIOMP-OSA Summer Session on Optical Engineering, Design and Manufacturing. 2013 Т. 1. С. 1-3.
- [3] Медикал Системз Сервайс [Электронный ресурс] Спектрофотометр Экохим ПЭ-5400УФ URL: <http://medicalss.ru/spektrofotometr-ekokhim-pe-5400uf.html>
- [4] ЭКОпроект [Электронный ресурс] Спектрофотометр УФ-1100 URL: <https://www.ecoprolab.ru/catalog/spektrofotometry/877/?yclid=857306943395006518>
- [5] Li N. и др. Portable dielectric barrier discharge-atomic emission spectrometer // Analytical chemistry. 2017. Т. 89. №. 4. С. 2205-2210.
- [6] Сигма-Колор [Электронный ресурс] NS810 URL: <https://3nh-color-gloss.ru/catalog/spektrofotometry/ns810/>
- [7] Hamamatsu [Электронный ресурс] Мини-спектрометры URL: [https://hamamatsu.su/files/uploads/pdf/5\\_спектрометры\\_и\\_мини-спектрометры/c12880ma\\_kacc1226e.pdf](https://hamamatsu.su/files/uploads/pdf/5_спектрометры_и_мини-спектрометры/c12880ma_kacc1226e.pdf)