

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.13>

УДК: 681.585.58+681.7.069.3

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ВАКУУМНО-УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА И МЕТОДИКА ИХ ФОТОМЕТРИИ

И.Д. Черникова¹, Н.Г. Черников¹, Е.Н. Черникова²

¹Луганский государственный университет имени Владимира Даля,
291034, Луганская Народная Республика, г. Луганск, квартал Молодежный, дом 20А

²Тверской государственный технический университет,
170026, Тверская область, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2026 г.

Аннотация. В последнее время достигнут значительный прогресс в разработке интенсивных источников излучения и новых оптических элементов для вакуумной ультрафиолетовой части спектра. Этот прогресс послужил основой для развития многих перспективных практических приложений: рентгенолитографии, рентгеновской голографии, микроскопии и т.д. Для развития этих направлений, в частности для оптимизации параметров источников и выбора оптических элементов, необходимы качественные количественные (абсолютные) измерения характеристик излучения. Однако проведение таких измерений в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне спектра является достаточно сложной задачей. Дело в том, что в этом диапазоне спектра все вещества обладают большим и сильно изменяющимся, в зависимости от длины волны, поглощением. Поэтому проведение таких измерений в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне спектра является достаточно сложной задачей. Дело в том, что в этом диапазоне спектра все вещества обладают большим и сильно изменяющимся, в зависимости от длины волны, поглощением. Поэтому все детекторы излучения требуют независимой калибровки по эталонному источнику во всем диапазоне длин волн,

так как их чувствительность зависит от свойств и чистоты поверхности, которая поглощает. В представленной работе показана методика фотометрии монохроматического излучения в ультрафиолетовой области спектра, используя два прибора: калиброванный термостолбик и фотоэлектронный умножитель, окно которого покрыто тонким слоем салицилово-кислого натрия.

Ключевые слова: фотоэлектронный умножитель, термоэлемент, количество фотонов, люминесценция.

Автор для переписки: Черникова Ирина Демьяновна, chernikova_i_d@mail.ru

Введение

Все детекторы излучения требуют независимой калибровки по эталонному источнику во всем диапазоне длин волн, так как их чувствительность зависит от свойств и чистоты поглощающей поверхности этого излучения.

Специфика оптических и фотоэлектрических измерений налагает определенные требования к источникам света.

Во-первых, они должны обладать одинаковой яркостью по всей площади поверхности излучения светового потока.

Во-вторых, поток лучевой энергии должен быть стабильным во времени, и обладать столь малыми флуктуациями, чтобы в рамках ошибок эксперимента они не влияли на результаты самого эксперимента.

В-третьих, интенсивность потока света, протекающего через площадь поверхности входной щели монохроматора должна быть величиной постоянной. Кроме этого, необходимо знать интенсивность полного спектра монохроматического излучения источника света.

Целью работы является определение интенсивности монохроматического излучения для измерения спектрального распределения квантового выхода фотоэмиссии с поверхности твердых тел.

1. Анализ последних исследований и публикаций.

Основным недостатком как оптической, так и фотоэлектронной спектроскопий является источник света, в котором поток лучевой энергии, как всегда, проявляет нестабильность при проведении экспериментов. В работе [1] приведены описания и конструкция высоковольтной водородной лампы, как источника ультрафиолетового излучения в диапазоне энергии до 11 эВ, используемой в фотоэлектронной и оптической спектроскопиях. Показано высокое качество и надежность этой водородной лампы как источника светового излучения, при использовании ее в фотоэлектронной спектроскопии.

Измерение общего количества радиации, попавшей на исследуемую систему (фотоэмиттер), называется актинометрией. При изучении фотоэмиссии необходимо знать полное количество попавшей на фотоэмиттер монохроматической световой энергии. Одним из типов актинометрии является термостолбик, представляющий собой группу термопар, у которых определенные концы прижаты к черной поверхности (поверхность покрыта платиновой чернью). Термостолбик – система термопар, соединенных последовательно, и служащая для усиления термоэлектрического эффекта. При измерении монохроматического излучения термостолбик помещают за выходной щелью монохроматора и определяют интенсивность монохроматического излучения, выходящего из монохроматора.

2. Изложение основного материала исследования.

Для изучения фотоэмиссии с поверхности твердого тела необходимо экспериментально исследовать два вида характеристик:

- 1) спектральное распределение квантового выхода фотоэмиссии $Y(h\nu)$;
- 2) энергетическое распределение фотоэлектронов $N(E)$, приведенное к величине квантового выхода.

Поскольку квантовый выход фотоэмиссии при данной энергии фотона:

$$h\nu = hc / \lambda, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света; ν – частота световой волны; λ – длина волны, определяется отношением полного числа фотоэлектронов $N_э$, к полному числу возбуждающих их фотонов $N_ф$ с этой же энергией $h\nu$:

$$Y(h\nu) = N_э / N_ф, \quad (2)$$

то для изучения спектрального распределения квантового выхода необходимо измерять полный фототок $I_э$ из эмиттера:

$$I_э = N_э \cdot e, \quad (3)$$

где e – заряд электрона; $N_э$ – число эмитированных электронов из исследуемого образца.

Интенсивность излучения, падающего на катод из монохроматора, то есть число падающих фотонов $N_ф$, вытекающее из формулы (2), необходимо знать для определения спектральных характеристик квантового выхода из фотоэмиттера. Интенсивность монохроматического излучения определялась с помощью термоэлемента с заданной чувствительностью.

Измерение интенсивности монохроматического света термостолбиком возможно производить в видимой области спектра, где достаточно интенсивное излучение. Применение термостолбика в ультрафиолетовой области монохроматического спектра было затруднено из-за наличия малых интенсивностей отдельных спектральных линий.

В настоящее время для измерения интенсивности ультрафиолетового света пользуются высокочувствительными приемниками излучения, переводя ультрафиолетовое излучение в видимое с помощью различных люминесцирующих веществ, люминесценция из которых подчиняется закону С.И. Вавилова, например, салицилово-кислый натрий $NaC_7H_5O_3$. Салицилово-кислый натрий – это белый

кристаллический порошок неприятного сладковатого вкуса, без запаха. Растворим в воде, спирте, глицерине.

Главное преимущество этого метода состоит в том, что он не требует источника света с известным распределением энергии по спектру, как эталона для градуировки в ультрафиолетовой области спектра. В таких веществах, как салицилово-кислый натрий $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$, люминесценция из которого при облучении его ультрафиолетовым светом подчиняется закону С.И. Вавилова, световой выход люминесценции $Y_{\phi л}$ пропорционален длине волны возбуждающего ультрафиолетового излучения:

$$Y_{\phi л} = I / I_0 = a \times \lambda, \quad (4)$$

где a – const; I – интенсивность люминесценции при поглощении энергии подающего ультрафиолетовому потоку света I_0 .

Так как энергия падающего монохроматического ультрафиолетового потока света I_0 равна произведению энергии кванта света $h\nu$ на число квантов N_{ϕ} , т.е.:

$$I = a \times \lambda \times I_0 = a \times \lambda \times N_{\phi} \times h\nu = a \times c \times h \times N_{\phi}, \quad (5)$$

где c – скорость света.

Отсюда видно, что, измеряя интенсивность люминесценции, можно получить число фотонов N_{ϕ} ультрафиолетового излучения, возбуждающих эту люминесценцию.

Интенсивность люминесценции трудно или, как в нашем случае, невозможно измерить с помощью термостолбика, учитывая, что эта интенсивность очень мала. Однако спектры люминесценции многих люминофоров, в том числе и салициловокислого натрия, не зависят от энергии фотонов возбуждающего ультрафиолетового света. Это дает возможность для измерения относительной интенсивности люминесценции использовать подходящий фотоумножитель или фотоэлемент. Требованием к последним будет высокая чувствительность в области спектра излучения люминофора и линейная зависимость величины

фототока фотоумножителя (фотоэлемента) от числа фотонов, падающих на фотокатод. Таким образом, с помощью люминофора и фотоумножителя можно измерять относительную интенсивность люминесценции и, следовательно, относительное число квантов возбуждающего ультрафиолетового излучения.

Абсолютное значение интенсивности монохроматического ультрафиолетового излучения можно определить по сравнению тока фотоумножителя, используемого для измерения относительной интенсивности с использованием люминофора, с ЭДС градуированного термостолбика для какого-либо участка спектра монохроматора, удобного для измерений интенсивности излучения обоими приборами.

В данной работе в качестве люминофора использовался салицилово-кислый натрий, исследовавшийся ранее в работе [2]. В данной работе показано, что квантовый выход $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$ в широком интервале длин волн от 3400 Å до 500 Å неизменный. Салицилово-кислый натрий $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$ растворялся в спирте и раствор наносился на окно фотоумножителя. Толщина слоя люминофора составляла примерно 30 мк [2], что является оптимальной толщиной.

Для измерения малых световых потоков используют фотоумножитель. (ФЭУ). Как фотоэлементы, так и фотоумножители являются основными приемниками излучения при работе с монохроматорами. Излучение, выделяемое из выходной щели монохроматора, направляется на входное окно фотоумножителя, покрытого в нашем случае слоем люминофора.

Спектр люминесценции салициловокислого натрия имеет максимальную интенсивность в области длины волны 4500 Å. Поэтому в качестве приемника люминесцентного излучения использовался фотоумножитель ФЭУ-19М, у которого фотокатод имеет квантовый выход эмиссии в области длин волн 4200 Å. Таким образом, предполагая, что ультрафиолетовый свет полностью поглощается слоем люминофора (причем преобразованный свет поглощается незначительно) можно считать, что ток ФЭУ-19М пропорционален числу падающих квантов ультрафиолетового излучения.

Как следует из литературных источников [3], для проведения абсолютных измерений в ВУФ области спектра (10-100 нм) был использован аналогичный простой люминесцентный детектор, абсолютная калибровка которого производилась, в отличие от нашего случая, УФ эксимерным лазером. Детектор был ФЭУ, перед которым размещается экран-пластина со слоем люминофора, наблюдения проводились в проходящем свете. В качестве люминофора использовали салицилово-кислый натрий $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$.

Монохроматическое излучение из монохроматора, пройдя через линзу, попадало на окно ФЭУ-19М с нанесенным на него люминофором толщиной 30 мк. Показания ФЭУ-19М давали относительное число квантов ультрафиолетовых спектральных линий. Для того чтобы получить абсолютное число квантов света, показание ФЭУ-19М при $\lambda = 2650 \text{ \AA}$ сравнивалось с ЭДС термостолбика при той же длине волны $\lambda = 2650 \text{ \AA}$ (чувствительность термостолбика в этой области спектра достаточна для измерения интенсивности спектральной линии этой длины). По абсолютной интенсивности при $\lambda = 2650 \text{ \AA}$ определяли число квантов для этой линии и отсюда – число квантов света для других линий. Числа фотонов N_ϕ для разных линий спектра водородной лампы, полученные таким образом, использовались нами при изучении спектрального распределения квантового выхода в работах [4,5], а также определение интенсивности световых потоков и их модулирование использовано в работах [6-10].

Заключение

В представленной работе показана методика определения интенсивности монохроматического излучения для измерения спектрального распределения квантового выхода фотоэмиссии с поверхности твердых тел в ультрафиолетовой области спектра, используя два прибора: калиброванный термостолбик и фотоэлектронный умножитель, окно которого покрыто тонким слоем салицилово-кислого натрия.

Литература

1. Черніков М.Г., Чернікова О.М., Гордєєв В.В. Воднева лампа як джерело ультрафіолетового випромінювання в фотоспектроскопії. IV Міжнародна научно-практична конференція «PRIORITY DIRECTINS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT». – 2020. Київ. <https://share.google/hLyJe9KwztAsGB8Ja> (Україна)
2. Ананьева Л.И., Шишловский А.А. Спектр люминесценции салицилово-кислого натрия. // ДАН. – 1937. – №17. С. 183-186. (СССР)
3. Шевелько А.П. Абсолютные измерения в ВУФ области спектра с помощью люминесцентного детектора. // Квантовая электроника. – 1996. – Т.23. №8. С.748-750. <https://doi.org/10.1070/QE1996v026n08ABEH000764> (СССР)
4. Черников Н.Г., Черникова И.Д., Черникова Е.Н. Влияние на фотоэмиссионные свойства asga адсорбированных атомов германия // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. – 2023. №1 (42). С.73-83. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54886621> (Россия)
5. Пилавов М.В., Черникова И.Д., Черников Н.Г. Фотометрия монохроматического излучения для измерения квантового выхода фотоэлектронов. // Вестник Луганского государственного университета им. Владимира Даля; научный журнал. – 2023. №12 (78). – С.78-81. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=62500819> (Россия)
6. Mikhailov P.S., Muzukin I.L., Mamontov Yu.I., Yu.A. Zemskov Yu.A., Uimanov I.V., Kaziev A.V., Kharkov M.M., Barenholts S.A. Threshold parameters of vacuum arcs with W-fuzz cathodes. // Journal of Nuclear Material. – 2023. – vol. 582. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154479> (Russia)
7. Гибин И.С., Котляр П.Е. Гибридные автоэмиссионные фотокатоды (обзор) // Успехи прикладной физики. – 2017. – Т 5, № 5. <https://advance.orion-ir.ru/UPF-17/5/UPF-5-5-497.pdf>
8. Войцеховский А.В., Ижнин И.И., Савчин В.П., Вакив Н.М. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники. // Томск: Издательский Дом Томского государственного университета. – 2013. (Россия)

9. Сафонов А., Матричные КМОП-фотоприемники: современное состояние и перспективы развития Микро- и наноструктуры. // ЭЛЕКТРОНИКА | наука | технология | бизнес. – 2019. – №2. (00183). С. 140-154. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2019.183.2.140.154>
10. Белкин М., Васильев М., Ключник Д., Кузнецов Е. Создание радиофотонной аппаратуры на базе технологий оптической и сверхвысокочастотной электроники. // ЭЛЕКТРОНИКА | наука | технология | бизнес. 2024. – №5. (00236). С. 106-120. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2024.236.5.106.120>

Для цитирования:

Черникова И.Д., Черников Н.Г., Черникова Е.Н. Источники излучения в вакуумно-ультрафиолетовой области спектра и методика их фотометрии. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.13>