

Сравнительный анализ источников света для спектрофотометров

М. А. Копейченко¹

УДК 621.321

Спектрофотометрия – метод анализа, который широко применяется в химии, биологии, медицине и многих других областях науки и техники. Одним из ключевых элементов спектрофотометра является источник света. Сегодня наиболее часто используются два типа источников излучения: ксеноновые и галогенные лампы в паре с дейтериевыми. В статье проведен сравнительный анализ этих типов ламп с целью выявления преимуществ и недостатков их применения в спектрофотометрии.

Ключевые слова: спектрофотометрия, поглощение, излучение, ксеноновые, галогенные, дейтериевые лампы

Спектрофотометр – это прибор, предназначенный для измерения степени светопоглощения, пропускания, оптической плотности и концентрации веществ. Принцип работы спектрофотометра основан на поглощении света веществом [1]. При разработке и выборе спектрофотометра очень важен источник света с точки зрения экономической эффективности и достоверности результатов измерения. Его спектральный диапазон и стабильность являются основополагающими метрологическими характеристиками. Наравне с выбором источника света стоит другое важное конструкторское решение – выбор детектора. На данный момент применяются два вида детекторов на основе внутреннего или внешнего фотоэффекта. На внутреннем фотоэффекте работают полупроводниковые детекторы, например кремниевые фотодиоды [2], на внешнем – фотоэлектронные умножители [3]. Для исследования источников излучения в качестве детектора выбран фотоэлектронный умножитель. Кремниевые фотодиоды не подходят, так как не обладают достаточной чувствительностью и сильно подвержены влиянию температуры.

Статья посвящена сопоставлению типов ламп с целью выявления преимуществ и недостатков их применения в спектрофотометрии.

Измерение спектральных характеристик ламп проводили на рабочем стенде спектрофотометра с фотоэлектронным умножителем Hamamatsu R928 [4] (рис. 1).

При разработке спектрофотометров возникает вопрос выбора источника света. Рассмотрим



Рис. 1. Исследовательский стенд спектрофотометра

¹ ООО «Промышленные экологические лаборатории».

наиболее часто используемые варианты источников излучения.

Галогенные лампы

Галогенные лампы представляют собой модифицированную версию вольфрамовых ламп накаливания. Внутри кварцевой колбы лампы содержится газ, обычно йод или бром, который предотвращает испарение вольфрама с нити накала. Это продлевает срок службы лампы и улучшает ее яркость. В нормативных документах обычно приводят следующие характеристики:

- спектральный диапазон: от 300 до 2000 нм;
- срок службы: 1000–4000 ч;
- высокая интенсивность света в видимом диапазоне.

На практике у лампы после 1500 ч работы заметно меняется спектр излучения, увеличивая погрешность измерений. Усиливается дрейф базовой линии, следовательно, прибору необходимо постоянно выставлять новое усиление на АЦП (аналого-цифровой преобразователь), или оператор должен заменить лампу и провести ее юстировку. Однако, это не гарантирует того, что спектр испускания новой лампы будет совпадать со спектром предыдущей. По этой причине в конструкторской документации необходимо заранее закладывать погрешность, которая на практике составляет примерно 0,1%.

Галогенные лампы не имеют нормативной документации на весь излучаемый спектр, а часто ограничиваются описанием цветовой температуры, что для измерительного оборудования не подходит. Все существующие галогенные лампы в фотометрии являются бытовыми, а не измерительными*.

Рассмотрим спектр излучения галогенной лампы (рис. 3), приведенный в [1], и сравним его с измеренным спектром излучения лампы Philips [9] на стенде (рис. 4).

На практике спектр излучения значительно отличается от приведенного в [1] и имеет существенные недостатки для точного измерения детектором – неравномерное излучение энергии на разных диапазонах волн.

На практике это означает, что без выборочного изменения усиления АЦП построить стабильную

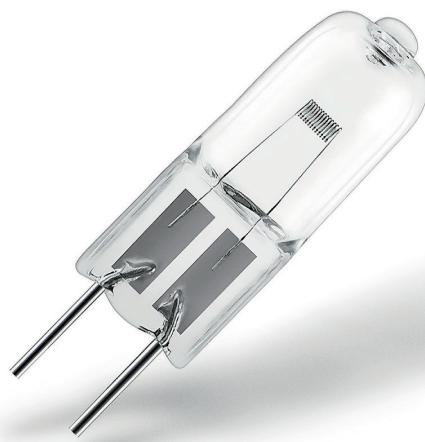


Рис. 2.
Галогенные
лампы

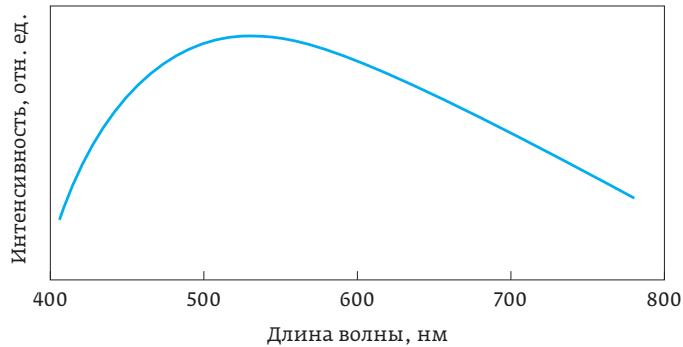


Рис. 3. Спектр излучения галогенной лампы [1]

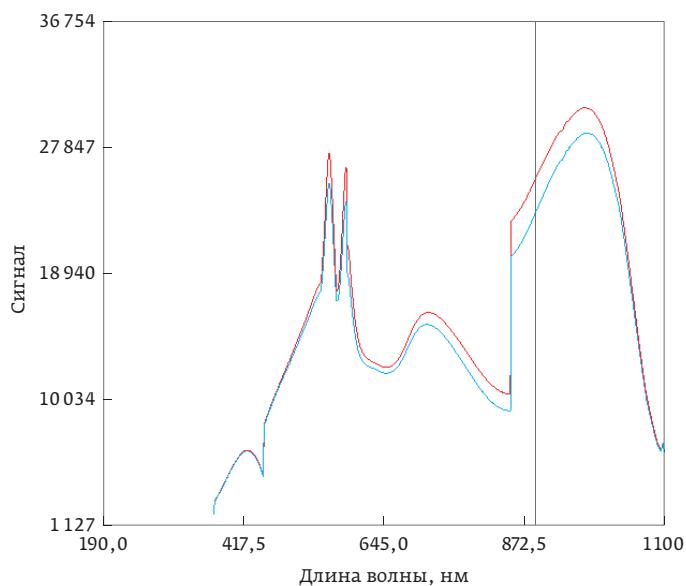


Рис. 4. Спектр излучения галогенной лампы Philips [9],
снятый на стенде

* В метрологии часто используется этот термин.

Измерительная лампа предполагает серийное изготовление с условием передачи и повторения определенной физической характеристики.

базовую кривую невозможно, особенно это актуально для работы в паре с дейтериевой лампой, так как ИК-излучение сильно зависит от температуры не только лампы, но и всех элементов электрической цепи. Необходимо проводить калибровку темнового тока каждый час после включения и прогрева прибора.

Преимущества галогенных ламп:

- низкая стоимость, простота замены и доступность;
- достаточно равномерное и сильное излучение в видимом диапазоне.

Недостатки:

- ограниченный спектральный диапазон. Практически не излучает в УФ-области;
- высокая температура. Выделение большого количества тепла приводит к нагреву образца и прибора, что влияет на результат измерений;
- огромная разница интенсивности излучения между видимым и ИК-диапазонами;
- необходимость частой замены лампы, что требует дополнительных затрат как времени, так и финансов.

Дейтериевые лампы

Дейтериевые лампы (рис. 5) представляют собой источники света, обладающие интенсивным ультрафиолетовым излучением. Они широко используются в спектрофотометрии для работы в УФ-диапазоне [6].

Дейтериевая лампа заполнена дейтерием, внутри находятся электроды, помещенные в герметичную



Рис. 5.
Дейтериевая
лампа [6]

кварцевую трубку. При приложении высокого напряжения к электродам, происходит газовый разряд, и молекулы дейтерия переходят в возбужденное состояние, излучая свет при возвращении в основное состояние.

Дейтериевые лампы излучают преимущественно в УФ-диапазоне от 160 до 400 нм. Основная часть интенсивного излучения приходится на интервал от 200 до 300 нм. В отличие от ламп с линейчатым спектром, у дейтериевых почти непрерывный спектр в УФ-области. Это делает их идеальными для целей, требующих равномерного освещения в этом диапазоне.

Рассмотрим спектры излучения дейтериевой лампы (рис. 6) из [1] и Hamamatsu [6] (рис. 7).

Спектры на рис. 6 и 7 практически совпадают. Для дейтериевой лампы требуется отдельный источник питания, как и другие значения усиления АЦП.

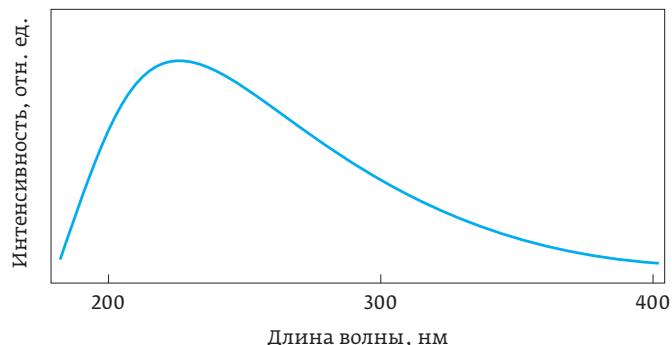


Рис. 6. Спектр излучения дейтериевой лампы [1]

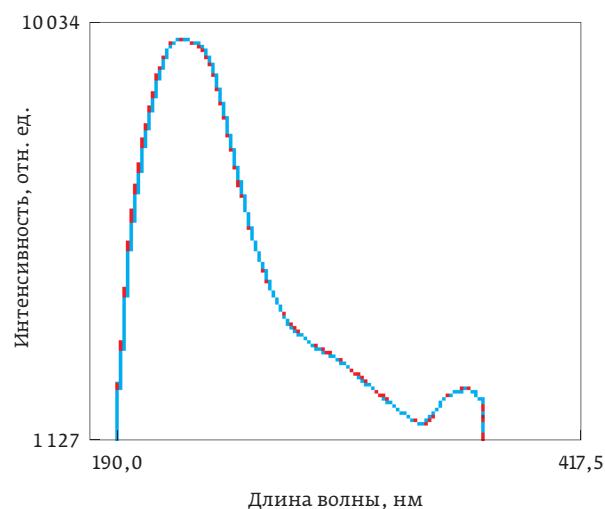


Рис. 7. Спектр излучения дейтериевой лампы Hamamatsu [6], снятый на стенде

Это увеличивает конечную стоимость прибора и требует особой юстировки.

Для дейтериевых ламп характерны некоторые недостатки галогенных ламп.

Преимущества дейтериевых ламп:

- высокая стабильность излучения, что важно для точных измерений в спектрофотометрии;
- достаточная интенсивность света в УФ-области для детектирования малых концентраций веществ.

Недостатки:

- срок службы дейтериевых ламп ограничен, обычно около 2000 ч;
- для поддержания стабильной работы требуется эффективная система охлаждения, как и отдельный источник питания, что значительно увеличивает стоимость прибора;
- замена дейтериевой лампы немного сложнее, чем галогенной.

разных длинах волн. Можно наблюдать огромные провалы с минимальным излучением в видимой области. На практике это означает, что проблем связанных с усилением АЦП значительно больше, чем у других типов ламп. Но есть одно важное различие: ксеноновая лампа практически не меняет свои характеристики даже после работы в течение более 10 тыс. ч, что позволяет использовать одну лампу на весь срок эксплуатации. Необходимость в юстировке так же отпадает, достаточно провести настройку на производстве. Юстировка может происходить в автоматическом режиме, но на практике приходится всегда перепроверять метрологические характеристики.

Главная особенность ксеноновой лампы в том, что она работает только в момент измерения. Следовательно, нагрев, влияющий на характеристики образца или прибора, отсутствует. Благодаря этому возрастает точность измерения.

Ксеноновые лампы

Ксеноновые лампы (рис. 8) являются газоразрядными лампами: излучение происходит за счет электрического разряда в атмосфере ксенона под высоким давлением [5].

Характеристики ксеноновых ламп:

- спектральный диапазон: от 190 до 1100 нм;
- срок службы: 5000 ч реальной работы;
- интенсивность света стабильная и неравномерная по всему спектру.

Сравним спектры излучения ксеноновой лампы (рис. 9) из [1] и измеренного на стенде (рис. 10).

Спектр излучения ксеноновой лампы на практике неравномерен по интенсивности излучения на

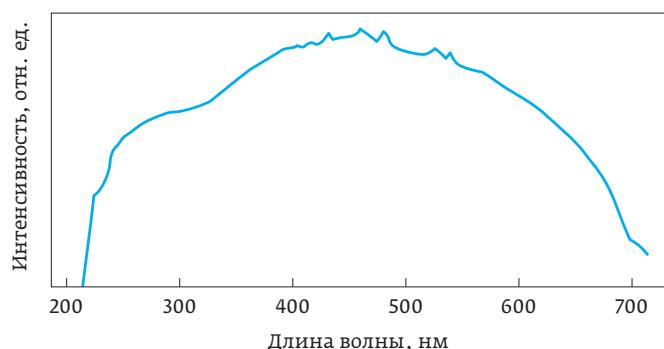


Рис. 9. Спектр излучения ксеноновой лампы [1]



Рис. 8.
Ксеноновая
лампа

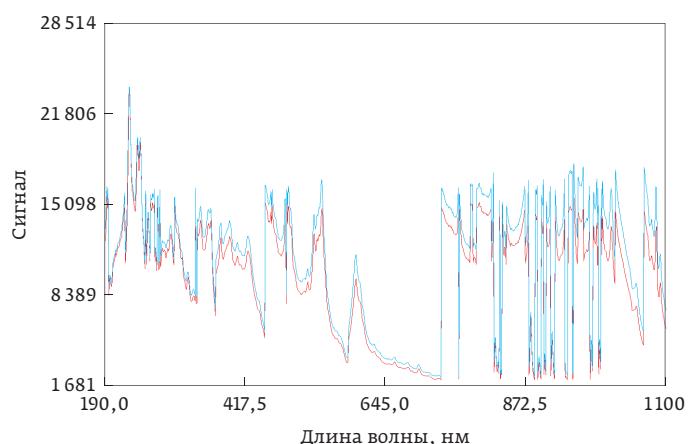


Рис. 10. Спектр излучения ксеноновой лампы Hamamatsu [5], снятый на стенде

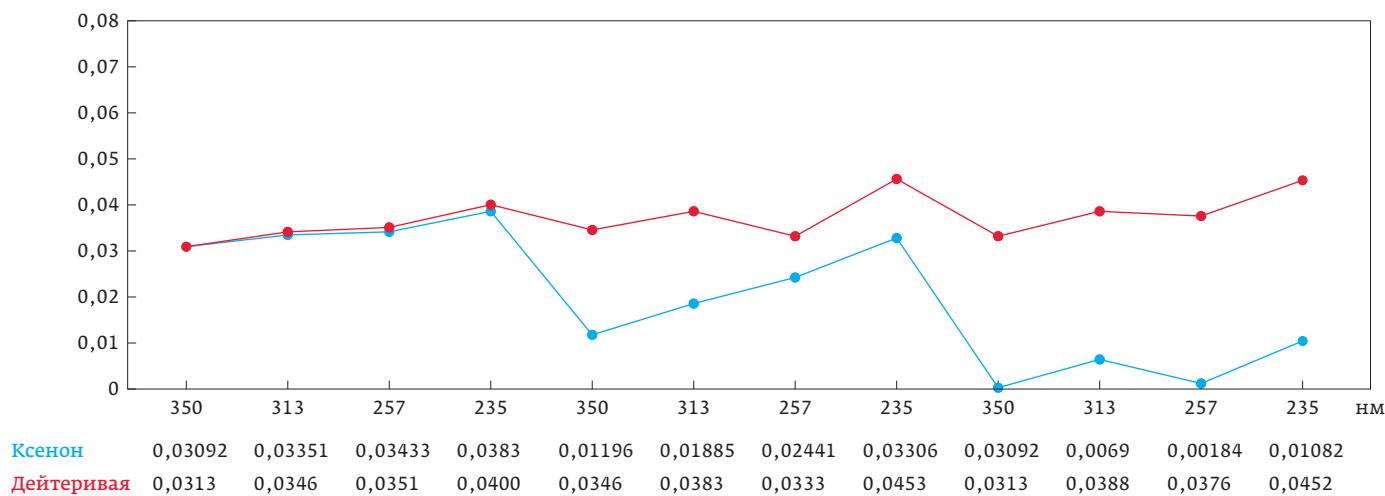


Рис. 11. Абсолютные погрешности измерения оптической плотности светофильтров из комплекта RM-USPEP20 в УФ-диапазоне, при облучении ксеноновой и дейтериевой лампами

К сожалению, применение ксеноновой лампы повышает стоимость прибора даже по сравнению с комплектацией, включающей две лампы – дейтериевую и галогенную. Ксеноновые лампы достаточно дороги и требуют отдельного блока регистрации сигнала, так как необходимо измерять только сигналы с определенной мощностью и длительностью. Для исключения погрешности, связанной с неправильным измерением, лампа производит несколько вспышек в течение секунды, с промежутком 0,2 с, и изменяется только среднее значение сигнала.

Преимущества ксеноновых ламп:

- широкий спектральный диапазон излучения. Можно проводить измерения даже в ИК-диапазоне;
- стабильная во времени интенсивность излучения. Характеристика излучения не меняется в течение эксплуатации;
- низкая температура нагрева минимизирует влияние на образец;
- источник света работает только во время измерения, что увеличивает срок службы.

Недостатки:

- высокая стоимость;
- сложность эксплуатации: требуют более сложного обслуживания и замены в сервисном центре.

Точность измерений с ксеноновым и галогенным источниками излучения

Проведены измерения абсолютной погрешности оптической плотности стандартных образцов в УФ-диапазоне комплекта светофильтров RM-USPEP20 [7]. Усредненные результаты измерений абсолютной погрешности приведены на рис. 11.

Погрешность измерения в УФ-диапазоне при использовании ксеноновой лампы, значительно ниже, чем с дейтериевой. Это достигается уменьшением влияния температуры на процесс

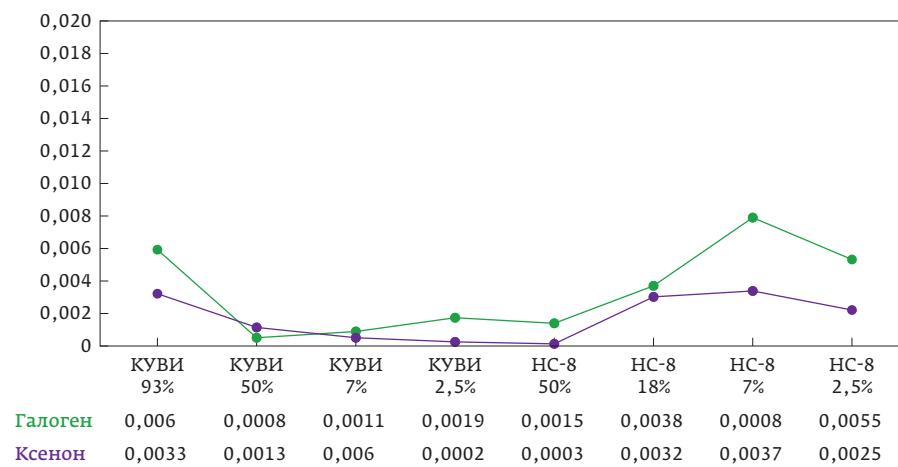


Рис. 12. Абсолютные погрешности измерения оптической плотности светофильтров из комплекта в КС-105 в видимом диапазоне при облучении ксеноновой и галогенной лампами

измерения, и большей интенсивностью излучения в УФ-диапазоне.

На рис. 12 приведены усредненные значения абсолютной погрешности измерения оптической плотности комплекта светофильтров КС-105 [8].

Анализируя рис. 11 и 12, можно сделать вывод, что использование разных источников излучения сильно влияет на результаты измерения. Вероятно, большая точность при измерении ксеноном вызвана уменьшением влияния температуры на процесс измерения. Результаты испытаний на нашем стенде показали, если использовать ксеноновую лампу, можно добиться улучшения точности измерений стабильно минимум на 0,1% в видимом диапазоне, и на 0,2% – в ультрафиолетовом. В рамках фотометрии это весомый аргумент в пользу ксеноновых ламп.

Заключение

Использование ксеноновых ламп в спектрофотометрии позволяет получить более точные и надежные результаты благодаря их широкому спектральному диапазону и высокой стабильной во времени интенсивности излучения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Галогенные лампы более экономичны и доступны, однако ограничены в своем применении из-за недостаточной интенсивности излучения в ультрафиолетовой области и быстрой утраты своих характеристик.

Литература / References

- Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2011. 574 с.
Pikhtin A. N. Optical and quantum electronics. Moscow: Higher School publ., 2011. 574 p.(in Russ)
- Анисимова И. И., Глуховский Б. М. Фотоэлектронные умножители. М.: Сов. радио. 1974. 64 с.
Anisimova I. I., Glukhovsky B. M. Photomultipliers. Moscow: Sov. Radio publ. 1974. 64 p.(in Russ.)
- https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/R928_R928P-R955_R955P_TPMS1091E.pdf (Date of access 15.02.2024).
- https://www.hamamatsu.com/us/en/product/light-and-radiation-sources/lamp/xe-f/2w_module.html (Date of access 15.02.2024).
- <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/light-and-radiation-sources/lamp/deuterium-lamp/L6309.html> (Date of access 15.02.2024).
- <https://www.chromspec.cz/sites/default/files/2023-11/References-for-Compliance-User-Guide.pdf> (Date of access 15.02.2024).
- <http://lomophotonica.ru/poverochnye-sredstva/komplekt-svetofiltrov-ks-105/>
- https://proflampa.ru/upload/iblock/f11/bsr0c5u2em6j2obxl6c6_xssr83b018z1/d9f50476_faff_11e9_80b7_002590d86b6f_d9f50476_faff_11e9_80b7_002590d86b6f.pdf

Авторы / Authors

Копейченко Михаил Александрович, главный метролог ООО «Промышленные экологические лаборатории» Санкт-Петербург, РФ. Области научных интересов: приборостроение. Kopeichenko Mikhail Alexandrovich, Chief metrologist of LLC Industrial Ecological Laboratories St. Petersburg, Russian Federation. Research interests: instrument making industry. E-mail: metrology@pe-lab.ru ORCID 0009-0008-0762-7056

Конфликт интересов / Conflict of Interest

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02.08.2024
Принята к публикации 20.09.2024



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Юрген Бёккер
СПЕКТРОСКОПИЯ

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 528 с., ISBN 978-5-94836-220-5

Спектроскопия как средство описания атомов, ионов и молекул с помощью типовых длин волн, измеряемых при возбуждении, принадлежит сегодня к важнейшим и самым распространенным методам инструментальной аналитики. Специальные измерительные устройства, в том числе абсорбционные и эмиссионные спектрометры, обеспечивают точное определение количественного и качественного состава газообразных, жидких и твердых веществ. В книге дается обзор разных методов атомной и молекуллярной спектрометрии и рассматриваются многие аналитические проблемы, решаемые в лабораториях промышленных предприятий, в естественнонаучных и технических учреждениях, а также проблемы изучения и защиты объектов окружающей среды. В книге представлена широкая гамма существующих методов исследования, а также перечень приборов с руководством по их применению.

Цена 1090 руб.

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru