

УДК 681.785

КОРРЕКЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УФ РАДИОМЕТРА СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В.В. Антонов, Г.Г. Ишанин

Рассматривается возможность измерения спектрально-энергетических эффективных величин в ультрафиолетовой области спектра, основанная на измерении спектрального состава излучения исследуемого источника с последующей компьютерной обработкой информации. Традиционное решение этих задач связано с созданием обширного ряда спектрально-измерительных приборов, имеющих индивидуальные спектральные характеристики чувствительности. Спектральная коррекция чувствительности фотоприемников, используемых в таких приборах – зачастую далеко не простая задача, решение которой сопряжено с неоправданным удорожанием измерительного прибора в целом. Предлагаемый метод определения спектральной облученности объектов в любом заданном участке спектра представляется перспективным.

Ключевые слова: спектрально-измерительный метод, спектрофотометрический метод, эффективные величины, полихроматор.

Введение

Сегодня в промышленности широко используются различные источники ультрафиолетового (УФ) излучения. Применение УФ излучения очень разнообразно, а качество технологического процесса зачастую зависит от спектральной облученности в узких спектральных интервалах. Вместе с тем УФ излучение может оказывать вредное влияние на человека и на окружающую среду. Существуют санитарные нормы, которые регламентируют безопасные значения УФ облученности для человека по зонам. Международная комиссия по освещению (МКО) в 1963 г. предложила разделить УФ излучение на три зоны: УФ-А – от 315 до 400 нм; УФ-В – от 280 до 315 нм; УФ-С – от 200 до 280 нм [1]. В связи с этим возникает необходимость измерения спектральной УФ облученности в этих спектральных интервалах.

Условно все современные УФ радиометры можно разделить на два класса: спектрально-измерительные и спектрофотометрические. Несмотря на широкий выбор УФ радиометров, как отечественного, так и иностранного производства, большинство из предлагаемых приборов имеют ряд существенных недостатков.

Так спектрально-измерительные УФ радиометры для измерения облученности в зонах А, В и С имеют три фотометрические головки с индивидуальными спектральными характеристиками чувствительности. Обычно они используют один селективный приемник излучения на внутреннем фотоэффекте, спектральная чувствительность которого приводится к заданной фильтрами. Неселективные тепловые приемники излучения с достаточной УФ чувствительностью отсутствуют. Существенными для спектрально-измерительных УФ радиометров являются большая погрешность измерений и нецелесообразность их использования для измерения излучения УФ источников с линейчатым спектром излучения, так как для них погрешность измерения облученности может достигать 100% и более, несмотря на заявленную производителем погрешность измерений 10%. Например, УФ радиометры фирмы PRC Krochmann GmbH имеют погрешность измерения облученности 8%. Погрешности измерения облученности УФ радиометра, выпускаемого фирмой Konica Minolta, составляют в зонах А, В и С 5%, 7% и 10% соответственно. Следует заметить, что с такой погрешностью, судя по спектральным характеристикам приборов, можно измерить ограниченное число источников УФ излучения [2]. Также к недостаткам спектрально-измерительных приборов следует отнести технологическую сложность подбора стеклянных оптических фильтров, с помощью которых корректируется спектральная чувствительность приемника оптического излучения радиометра, номенклатура которых ограничена количеством материалов, пропускающих УФ излучение. Для точных измерений в лабораторных условиях используются спектрофотометрические приборы, которые позво-

ляют измерять большинство контролируемых энергетических и эффективных величин с большой точностью, однако их применение в промышленных условиях не представляется возможным.

Производители современных промышленных УФ радиометров используют различные методы, чтобы повысить точность измерительных средств. Однако, несмотря на множество разработанных методов, решить данную проблему можно лишь для определенного типа источников. Это связано, прежде всего, с принципами построения самого измерительного средства. С появлением новых типов УФ источников излучения известные методы измерения не позволяют получать требуемые метрологические характеристики.

Таким образом, в последнее время сформировался целый ряд научно-технических проблем, которые можно разрешить спектрофотометрическим методом. Разработанный на основе этого метода спектральный УФ радиометр «ТКА-УФ» позволяет измерять УФ облученность источников не только в трех регламентированных зонах, но и в любом желаемом спектральном интервале. Небольшой переносной прибор имеет одну фотометрическую головку, которая подключается к компьютеру. Программное обеспечение позволяет получать также информацию о спектральном распределении потока исследуемого излучения в виде графика на экране монитора. Наличие программного обеспечения также дает возможность вычислять бактерицидную или эритемную эффективности источников излучения.

Спектрозональный метод

В настоящее время к промышленному измерению параметров УФ излучения подходят, основываясь на спектрозональном методе измерения. Типичный спектрозональный УФ радиометр состоит из ряда простых оптических элементов (рис. 1). Излучение проходит через диафрагму 1, которая ограничивает поле зрения системы. Для улучшения пространственной характеристики приемника часто после диафрагмы располагают матовое стекло 2. Оптический фильтр 3 служит для выделения спектральной области, в которой работает радиометр. В качестве приемника оптического излучения (ПОИ) 4 обычно используют фотодиод [2].

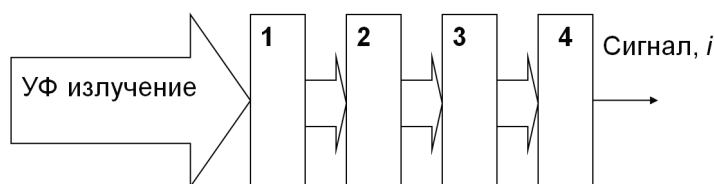


Рис. 1. Структурная схема спектрозонального прибора

Спектрозональный метод обладает рядом преимуществ (простота использования, скорость получения результата и т. п.) и широко используется в промышленности. При этом идеальный УФ радиометр в рабочем спектральном диапазоне должен обладать относительной спектральной чувствительностью, равной 1, а вне границ она должна быть равна 0. Спектральная чувствительность идеального прибора показана на рис. 2. Для работы в УФ области спектральные характеристики приемников максимально приближают к заданной эффективности или к П-образному виду.

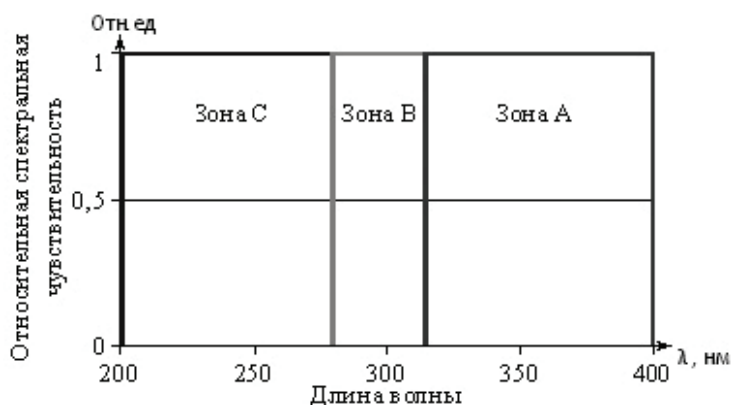


Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность идеального УФ радиометра

Как было отмечено, в УФ радиометрах спектрозонального типа коррекция спектральной чувствительности ПОИ осуществляется с помощью стеклянных оптических фильтров. Несоответствие спектральной чувствительности УФ радиометра идеальной (рис. 2) приводит к значительным погрешностям в измерении спектрозональной облученности от источников со сложным спектральным составом [3]. Эта

погрешность может достигать значительных величин. Сигнал, снимаемый с ПОИ, определяется по формуле:

$$i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности потока излучения, падающего на радиометр, Вт/нм; $S(\lambda)$ – значение абсолютной спектральной чувствительности УФ радиометра, А/Вт.

Так как сигнал, вычисляемый по формуле (1), зависит от спектрозонального потока излучения, то при воздействии потоков различных источников УФ излучения (например, с одинаковой энергией излучения, но с разным спектральным распределением, выходящим за пределы спектральной чувствительности прибора) получаются разные сигналы. Отличие формы спектральной характеристики чувствительности ПОИ радиометра от формы для идеальной головки (рис. 2) в процессе измерений можно учесть вводом поправочного коэффициента отличия для каждого типа источника излучения. Поправочный коэффициент отличия определяется расчетным путем как отношение сигналов, полученных при действии данного типа источника излучения на идеальную и реальную головки [1]:

$$K_{\text{попр}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda}^{\text{ист}}(\lambda) \cdot S^{\text{ид}}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda}^{\text{ист}}(\lambda) \cdot S^{\text{пр}}(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 – границы спектральной зоны облученности, нм; $\Phi_{e\lambda}^{\text{ист}}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности потока излучения измеряемого источника; $S^{\text{ид}}(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика чувствительности идеального прибора; $S^{\text{пр}}(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность реального прибора. Ввод поправочного коэффициента, вычисленного по формуле (2), позволяет значительно повысить точность спектрозональных УФ радиометров. Однако данная методика имеет свои ограничения. Для достижения более высоких точностей измерения спектрозональной УФ облученности требуется метод измерения, принципиально отличный от предыдущего.

Спектрофотометрический метод

Искомый спектрозональный поток излучения, падающий на радиометр, можно получить, интегрируя функцию распределения спектральной плотности потока излучения в заданном спектральном диапазоне [4]:

$$\Phi_e(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda.$$

Такой путь определения спектрозональной облученности в выбранном спектральном интервале λ_1 до λ_2 в УФ области спектра с компьютерной обработкой результатов решает многие проблемы, присущие приборам классического типа. Он дает возможность отказаться от коррекции спектральной чувствительности фотоприемников стеклянными оптическими фильтрами и тем самым свести к минимуму суммарную погрешность измерения спектрозональной облученности.

Рассмотрим образование спектра диспергирующими системами с селективной фильтрацией, т.е. с пространственным разделением по длинам волн. В результате таких явлений, как дисперсия или дифракция света, поток оптического излучения после прохождения диспергирующей системы раскладывается в спектр. Причем каждая монохроматическая составляющая падающего потока излучения, в зависимости от параметров диспергирующей системы, занимает строго определенное положение. Если поместить многоэлементный приемник оптического излучения (МПОИ) в фокальную плоскость диспергирующей системы, то каждый элемент МПОИ будет регистрировать поток излучения только определенной монохроматической составляющей исследуемого излучения.

Сигнал P_{λ_i} , снимаемый с каждого элемента МПОИ, представляет собой произведение спектральной чувствительности этого элемента S_{λ_i} на монохроматическую составляющую Φ_{λ_i} падающего на него потока:

$$P_{\lambda_i}(\lambda) = S_{\lambda_i}(\lambda) \cdot \Phi_{\lambda_i}(\lambda).$$

Если известно спектральное распределение падающего потока излучения $\Phi_{\lambda_i}(\lambda)$, то легко получить спектральную чувствительность S_{λ_i} каждого элемента. Для этого можно использовать излучение фотометрической лампы с известным табулированным значением спектральной плотности потока излучения. Зная реальную чувствительность каждого элемента МПОИ, можно получить необходимые попра-

вочные коэффициенты для этого элемента, чтобы привести спектральную чувствительность УФ радиометра к идеальной П-образной кривой для вычисления спектральной облученности входной щели УФ радиометра. Поправочный коэффициент можно получить из выражения

$$S_{\lambda_i}(\lambda) = k_{\lambda_i} \cdot \frac{P_{\lambda_i}(\lambda)}{\Phi_{\lambda_i}^{\text{таб}}(\lambda)}, \quad (3)$$

где k_{λ_i} – поправочный коэффициент, учитывающий усиление сигнала для i -го элемента МПОИ, вырабатываемого микропроцессором; $\Phi_{\lambda_i}^{\text{таб}}$ – спектральная плотность потока излучения стандартного источника.

Используя различные коэффициенты усиления k_{λ_i} в электронном тракте, можно изменять чувствительность элемента МПОИ к данной (падающей на него) длине волны (3). Таким образом, можно корректировать спектральную чувствительность УФ радиометра в любом заданном спектральном интервале и привести ее к любому виду, в том числе и к П-образному при $S_{\lambda}(\lambda) = 1$.

На основе спектрофотометрического метода был создан УФ радиометр ТКА-УФ, показанный на рис. 3. УФ радиометр модели ТКА-УФ представляет собой полихроматор на основе вогнутой дифракционной решетки с регистрацией излучения, разложенного фотодиодной линейкой, и микропроцессорным управлением, выдающий цифровые данные на совместимый с ОС Windows® PC компьютер – ASUS® Eee PC 701. Конструктивно прибор состоит из двух функциональных блоков – оптоэлектронного блока и блока обработки сигнала, связанных между собой гибким многожильным кабелем.

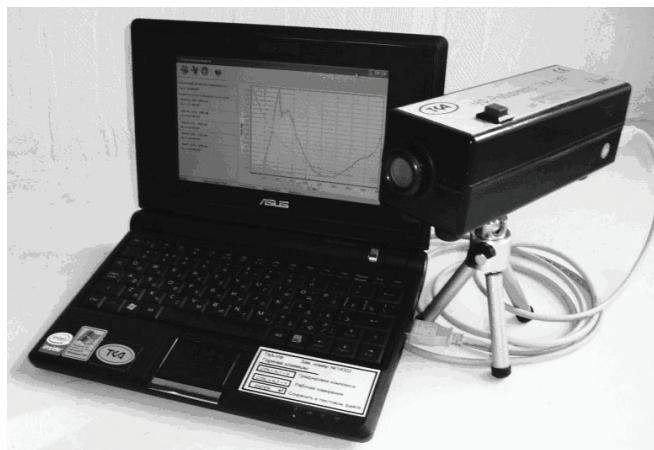


Рис. 3. Внешний вид УФ радиометра ТКА-УФ

Принцип действия прибора основан на измерении спектра излучения источников оптического излучения в УФ области 210–400 нм с последующей математической обработкой результатов измерения с помощью микропроцессорного устройства.

Оптоэлектронный блок представляет собой полихроматор, показанный на рис. 4. Излучение от измеряемого УФ источника 1 попадает на входное устройство, в котором находится матовое кварцевое стекло 2 и входная щель 3. Матовое кварцевое стекло 2 устанавливается во входном устройстве для равномерного освещения входной щели 3. Спектральный коэффициент пропускания кварцевого стекла имеет крутой фронт и начинается с 210 нм. Это позволяет устранить влияние вторых порядков, неизбежно возникающих при работе с дифракционными решетками. В качестве диспергирующего элемента используется вогнутая дифракционная решетка 4. Она фокусирует спектр на МПОИ 5, с которого снимается сигнал для последующей обработки и вычисления измеряемых спектральных величин УФ излучения.

Полихроматор построен по схеме Пашена–Рунге, в которой входная щель, дифракционная решетка и выходная щель (или ПОИ) помещаются на круге Роуленда (рис. 4). Ширина входной щели выбирается в зависимости от необходимого спектрального разрешения полихроматора. Как показано в [1], для проведения арбитражных измерений энергетических эффективных величин различных УФ источников спектральное разрешение диспергирующей системы должно быть не более 5 нм. Как показали исследования, при использовании вогнутой решетки радиусом $R=125$ мм с числом штрихов 300 мм^{-1} для выбранной оптической схемы полихроматора спектральное разрешение достигает значения 3 нм, что вполне обеспечивает требуемую точность в определении распределения спектральной плотности измеряемого потока излучения.

В качестве МПОИ в УФ радиометре используется гибридная фотодиодная линейка (ФДЛ) с регистром считывания на ПЗС-основе с косвенной связью через активные элементы, которые осуществляют считывание, временную задержку и накопление информационного сигнала [3]. Выбранная линейка ФДЛ S3901 фирмы Hamamatsu обладает повышенной чувствительностью в УФ области спектра. Выбор подоб-

ного типа МПОИ позволяет упростить конструкцию и повысить эксплуатационные характеристики прибора. ФДЛ имеют, по сравнению с ПЗС, более высокую линейность энергетической характеристики и больший динамический диапазон по облученности. Для управления работой ФДЛ достаточно подачи всего лишь двух управляющих сигналов, а все остальное преобразование осуществляется за счет внутренней структуры самой линейки, так как в каждом фоточувствительном элементе находится активная схема усиления сигнала. Это позволяет повысить быстродействие и повысить помехоустойчивость системы [1].

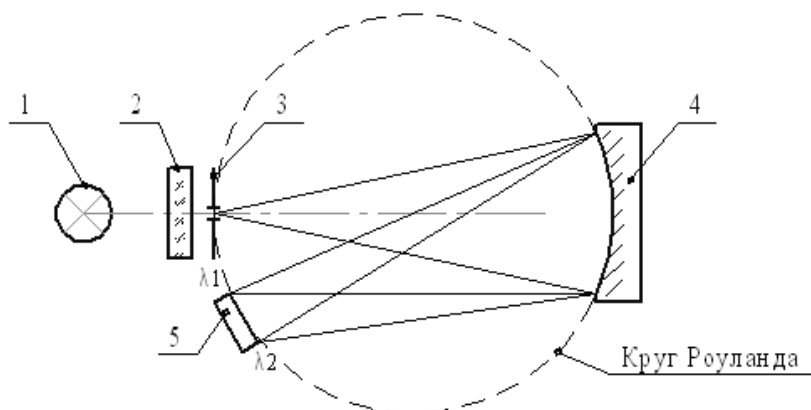


Рис. 4. Оптическая схема полихроматора

Исследование метрологических характеристик УФ радиометра ТКА-УФ показали, что прибор данного типа позволяет измерять спектрзональную облученность различных источников оптического излучения, в том числе и со сложным спектральным составом. В таблице приведены погрешности измерения спектрзональной облученности, создаваемой различными источниками УФ излучения. Исследовались характеристики спектрзонального прибора ТКА-ПКМ (12) и спектрофотометрического УФ радиометра ТКА-УФ. В качестве исследуемых источников были взяты стандартные лампы: ЛУФ – люминесцентная ртутная ультрафиолетовая лампа; МГЛ – металлогалогенная лампа; Дейтер. – дейтериево-неоновая лампа низкого давления. Как видно из таблицы при сложном спектральном составе излучения погрешность для прибора спектрзонального типа может достигать значительных величин. При этом спектрофотометрический метод позволяет учесть спектральные особенности УФ источника. Точность измерения спектрзональной облученности ТКА-УФ намного выше по сравнению с приборами спектрзонального типа.

Тип лампы	Погрешность измерения					
	зона А		зона В		зона С	
	ТКА-ПКМ (12)	ТКА-УФ	ТКА-ПКМ (12)	ТКА-УФ	ТКА-ПКМ (12)	ТКА-УФ
ЛУФ	7%	5%	110%	4%	–	3%
МГЛ	6%	3%	8%	3%	30%	3%
Дейтер.	10%	2%	50%	2%	232%	2%

Таблица. Погрешность измерения спектрзональной энергетической облученности

Заключение

На сегодняшний день большинство приборов для измерения энергетических эффективных величин в УФ области спектра относятся к спектрзональному типу с индивидуальными спектральными характеристиками чувствительности. Однако данный вид измерительной аппаратуры, обладая рядом преимуществ, не может обеспечить быстро растущие требования по точности для современной промышленности. УФ радиометр ТКА-УФ на основе спектрофотометрического метода фотометрических измерений позволяет измерять спектрзональную облученность различных источников УФ излучения, в том числе со сложным спектральным составом, с погрешностью 2–5%, в то время как у спектрзонального прибора типа ТКА-ПКМ (12) с индивидуальной спектральной характеристикой чувствительности погрешность может достигать 230%.

Литература

- ГОСТ Р 8.590-2001. Средства измерений характеристик ультрафиолетового излучения в охране труда. – Введ. 01.07.2002. – М.: Госстандарт, 2002. – 24 с.

2. Кузьмин В.Н. Разработка и исследование приборов для измерения параметров и характеристик источников оптического излучения // Дис. ... д.т.н. – СПб, 2007. – С. 49–50.
3. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения: Учебное пособие для вузов. – СПб: Папирус, 2003. – 527 с.
4. Ишанин Г.Г., Козлов В.В. Источники излучения: Учебное пособие для вузов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 395 с.

Антонов Владимир Владимирович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, snoor_85@mail.ru

Ишанин Геннадий Григорьевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, snoor_85@mail.ru