

В. К. БУТЕНКО, В. Г. ЮРЬЕВ,
к. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, Б. Г. ШАБАШКЕВИЧ

Дата поступления в редакцию
22.05 2006 г.

Украина, г. Черновцы, НПФ «Тензор», ЦКБ "Ритм"
E-mail: chtenz@chv.ukrpack.net

Оппонент к. ф.-м. н. В. А. БОРЩАК
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

РАДИОМЕТР УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ «ТЕНЗОР-31»

Отличительной особенностью УФ-радиометра является двухканальная схема обработки оптического сигнала, а также возможность измерения энергетической освещенности, создаваемой нестандартными источниками излучения.

Сегодня в промышленности широко используются разнообразные источники оптического излучения, в том числе ультрафиолетового (УФ), спектральный состав которых влияет на биологические процессы, протекающие в организме человека. Именно эта область спектра оптического излучения — 200—400 нм — предопределяет разные фотохимические реакции и разрыв химических связей для многих химических веществ [1]. В связи с этим актуальной является проблема точного измерения характеристик УФ-излучения с помощью УФ-радиометров. Для обеспечения санитарно-гигиенических условий труда разработаны нормативы допустимой УФ энергетической освещенности [2], которые составляют в поддиапазоне А (315—400 нм) не более 50 Вт/м², в поддиапазоне В (280—315 нм) не более 0,05 Вт/м² и в поддиапазоне С (200—280 нм) не более 0,001 Вт/м². При этом погрешность измерений не должна превышать ±10%.

Актуальность задачи измерения энергетической освещенности, создаваемой УФ-излучением, обусловлена также и фактором увеличения УФ-излучения на поверхности Земли в результате разрушения озонового слоя [3].

Известные УФ-радиометры характеризуются рядом недостатков. Одним из них, по нашему мнению, является необходимость использовать для исследования каждого поддиапазона спектра УФ-излучения (А, В, С) отдельный прибор. Радиометры CUV3, UVS A, UVSAB фирмы Kipp Zonen (Нидерланды) [4] характеризуются невысокими метрологическими параметрами и высокой ценой (3400—5335 €). Тот же недостаток имеют радиометры типа DM (США) [5] и типа «Аргус» (Россия) [6]. Недостаточно широкий динамический диапазон измерений (0,01—35 Вт/м²) ограничивает применение радиометров типа EW-97503 фирмы Cole-Parmer (США) [7]. У радиометров UVM и UVM-SS фирмы Apogee Instruments Inc. (США) большая погрешность измерений (±15%) [8].

Проведенные нами исследования радиометров «Аргус» показали, что погрешность измерений этих приборов достигает ±30% за счет большой ошибки юстировки. Радиометр ТКА-АВС [9] фирмы ТКА (Россия), по результатам наших исследований, не в полном объеме удовлетворяет санитарно-гигиениче-

Параметры радиометров УФ-излучения относительно действующих нормативов

Параметр	Норматив	Измеренные значения параметров для различных радиометров				
		УФР-21	Аргус-04	Аргус-05	Аргус-06	ТКА-АВС
Диапазон измерения энергетической освещенности, $E_{\text{мин}}-E_{\text{макс}}$, Вт/м ²	10 ⁻⁴ —200	10 ⁻⁴ —200	Соответствует*	Соответствует*	Соответствует*	1·10 ⁻³ —40
Спектральный диапазон чувствительности, нм	315—400 280—315 200—280	Соответствует	Соответствует**	Соответствует**	Соответствует**	Не соответствует
Основная относительная ошибка измерения d_E , %, не более	±10	±8	±30*	±30*	Не определена	±9
Косинусная ошибка, %, не более	30°—±5 60°—±10 80°—±20	±5 ±15 ±25	Не соответствует	Не соответствует	Не соответствует	Не соответствует
Время выхода на рабочий режим $t_{\text{раб}}$, с, не более	—	2	Соответствует	Соответствует	Соответствует	—
Ошибка юстировки $d_{\text{ю}}$, %	—	±2,5	±25*	±30*	±1,5*	±5*
Нестабильность d_1 , %	—	±0,7	±1	±1	±1	±0,6
Нелинейность d_2 , %	—	±0,8	±1	±1	±1	±3

* Только для ртутных ламп.

** Без учета остаточной чувствительности за пределами диапазона.

ским требованиям. Общим недостатком всех вышесписанных приборов является ограниченная область применения — они предназначены для измерения УФ-излучения, генерированного ртутными лампами, в то время как в производстве и в быту используются и дейтериевые, и дуговые, и другие источники.

Радиометр УФР-21 [10] фирмы «Тензор» обеспечивает измерение энергетической освещенности, создаваемой не только ртутными лампами, но и дуговыми источниками. Существуют и другие источники УФ-излучения, которые используются в современном производстве. Сравнительные характеристики УФ-радиометров, которые чаще других используются украинскими потребителями, приведены в **таблице**.

Целью настоящей разработки было создание радиометра, способного измерять энергетическую освещенность, создаваемую различными источниками в производстве источников УФ-излучения.

При разработке УФ-радиометра учитывалось, что чувствительность фотоприемника за пределами измеряемых поддиапазонов спектра может привести к искажению результатов измерений. В связи с этим после анализа характеристик известных фотоприемников [11] в качестве датчика УФ-излучения был применен фотодиод УФД20 на основе фосфида галлия, разработанный специально для комплектации измерителей параметров УФ-излучения. Область его спектральной чувствительности составляет 220—500 нм, потенциальным барьером, разделяющим фотогенерированные носители заряда, служит поверхностный барьер между токопроводящей пленкой окисла металла и фосфидом галлия [12—14]. Разработанный фотодиод характеризуется более высокой, чем у аналогов, чувствительностью — до 0,25 А/Вт в максимуме спектральной характеристики (440 нм) и имеет площадь фоточувствительного элемента, в зависимости от типа, 20 и 100 мм², что позволяет обеспечивать достаточную чувствительность радиометра при потоках 10⁻⁴ Вт/м².

При разработке радиометра были исследованы и учтены необходимые для калибровки поправки, обусловленные несоответствием спектральной характеристики излучателя и радиометрической головки. Рассчитаны сдвиги эффективных длин волн (ненулевая чувствительность вне соответствующей области спектральной чувствительности) [15].

Проведенные исследования позволили разработать УФ-радиометр "Тензор-31" для измерения энергетической освещенности, создаваемой естественными и искусственными источниками с линейчатым или непрерывным спектрами излучения в спектральном диапазоне от 200 до 400 нм в спектральных поддиапазонах С, В, А. Индикация результатов измерения — цифровая.

Диапазон измерения энергетической освещенности радиометра «Тензор-31» составляет от 1·10⁻⁴ до 2·10² Вт/м² в каждом из спектральных поддиапазонов. Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений в диапазоне от 1·10⁻³ до 2·10² Вт/м² не более ±10%. В диапазоне от 1·10⁻⁴ до 1·10⁻³ Вт/м² пределы допускаемой основной относительной погрешности определяются по формуле

$$\delta = \pm \left(\delta_E + 0,01 \frac{A_n}{A_x} \right), \quad (1)$$

где δ_E — предел основной относительной погрешности измерений энергетической освещенности в диапазоне от 1·10⁻³ до 2·10² Вт/м², %;

A_n — максимальное значение цифровой индикации УФ-радиометра (без учета запятой), отн. ед.;

A_x — показания УФ-радиометра (без учета запятой), отн. ед.

При расчете пределов допускаемой основной относительной погрешности измерений энергетической освещенности учтены величины, которые большинством разработчиков не учитываются, в частности, кратковременная нестабильность чувствительности (нестабильность показаний на протяжении 5 мин непрерывной работы радиометра), которая у радиометра «Тензор-31» составляет не более ±1%. Допускаемая дополнительная (температурная) погрешность, вызванная изменением температуры окружающего воздуха от 20°С в пределах диапазона рабочих температур, составляет не более ±0,5% на 1°С. Нелинейность энергетической характеристики (отклонение от линейного закона) не превышает ±2%.

Питание радиометра осуществляется от вмонтированной батареи гальванических элементов типа 6F22 напряжением 9 В. Потребляемая мощность радиометра не превышает 0,12 Вт. Время непрерывной работы — не менее 8 часов.



Рис. 1. УФ-радиометр "Тензор-31"

УФ-радиометр «Тензор-31» состоит из электронного измерительного блока, радиометрической головки и переменных фильтров поддиапазонов А, В и С. Внешний вид прибора приведен на **рис. 1**. На лицевой панели размещено четырехрядное цифровое табло и кнопки управления, функции которых изменяются в процессе работы с прибором. На верхнем торце измерительного блока установлен разъем типа РС-4 для подсоединения радиометрической головки. На левой боковой стенке размещен разъем для подсоединения внешнего стабилизированного источника питания.

Структурная схема радиометра «Тензор-31» приведена на **рис. 2**.

Переменный фильтр 1 корректирует спектральную характеристику чувствительности фотоприемника 2 и используется для формирования рабочего спектрального диапазона радиометрической головки (РГ). Так как реальная спектральная характеристика чувствительности РГ отличается от идеальной, то такая

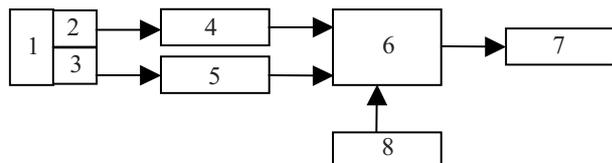


Рис. 2. Структурная схема радиометра «Тензор-31»: 1 — переменный фильтр (А, В или С); 2, 3 — фотоприемники первого и второго каналов; 4, 5 — преобразователи "ток—напряжение" первого и второго каналов; 6 — микроконтроллер; 7 — жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) 16×4; 8 — клавиатура

головка чувствительна вне рабочего спектрального диапазона. Поэтому конструкция РГ представляет собой двухканальную оптическую систему, в которой один канал является рабочим, а второй — каналом компенсации потоков излучения, которые находятся вне рабочего спектрального диапазона [16]. Эта конструктивная особенность существенно отличает разработанный УФ-радиометр от известных аналогов.

Световой сигнал от источника излучения, попадая на фоточувствительные элементы фотоприемников соответственно первого и второго каналов (2, 3) РГ, генерирует фототоки, которые превращаются преобразователями "ток—напряжение" (4, 5) в пропорциональные напряжения постоянного тока. Напряжения фотосигналов с выходов преобразователей "ток—напряжение" поступают на аналоговый вход микроконтроллера (6), в функции которого входят измерения аналоговых напряжений, расчет энергетической освещенности в рабочем спектральном диапазоне, вывод результатов измерения и расчеты на индикатор. Величина рассчитанной освещенности выводится на ЖКИ, куда также выводится оперативная информация с микроконтроллера.

УФ-радиометр работает в диалоговом режиме. Программное обеспечение позволяет выбирать и устанавливать как диапазон измерений (А, В, С), так и тип источника излучения — ртутный, дейтериевый, дуговой. При этом микроконтроллер вводит соответствующие поправочные коэффициенты, учитывающие отличие спектральной характеристики источника от спектральной характеристики радиометрической головки УФ-радиометра. Кроме того, программное обеспечение радиометра позволяет вводить параметры источника излучения, характеристики которого отличны от ртутного, дугового и дейтериевого.

Измерение энергетической освещенности, которая создается источником, проводится следующим образом.

После выбора в меню параметра «выбор» на табло устанавливаются значения коэффициента K_i источника излучения, освещенность которого измеряется. Коэффициент K_A — это коэффициент отличия формы относительной спектральной характеристики чувствительности ($S_{л}^{PG(A)}$) реальной РГ от формы характеристики теоретической РГ ($S_{лТ}^{PG(A)}$) для исследуемого источника УФ-излучения в А-поддиапазоне (315—400 нм). Относительная спектральная характеристика чувствительности теоретической РГ $S_{лТ}^{PG(A)}$ оценивается как 1 в рабочем диапазоне 315—400 нм в пределах интегрирования от 200 до 500 нм, а вне рабочего диапазона $S_{лТ}^{PG(A)}$ оценивается как 0. В связи с этим поправочный коэффициент K_A определяется как

$$K_A = \frac{\int_{\lambda=200}^{\lambda=500} S_{лТ}^{PG(A)} \cdot r_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int_{\lambda=200}^{\lambda=500} S_{л}^{PG(A)} \cdot r_{\lambda} \cdot d\lambda}, \quad (2)$$

где r_{λ} — спектральное распределение потока излучения источника, отн. ед.

Аналогично определяются и вводятся коэффициенты K_B и K_C для области В (пределы интегрирования от 200 до 325 нм) и для области С (пределы интегрирования от 200 до 295 нм).

Пределы основной допустимой относительной погрешности измерения энергетической освещенности определяются по погрешности юстировки радиометра, нелинейности энергетической характеристики чувствительности и кратковременной нестабильности чувствительности, что позволяет учесть погрешности, вносимые этими параметрами.

Разработанный радиометр УФ-излучения «Тензор-31» внесен в Государственный реестр средств измерительной техники Украины. Он рекомендован для оснащения метрологических служб, лабораторий санитарно-эпидемиологического надзора, исследовательских лабораторий охраны труда, а также при экологическом мониторинге и в медицинских целях. Радиометр может найти применение при измерении мощности монохроматического излучения в спектральном диапазоне 220—400 нм, в фотометрии УФ-областей А, В и С, для исследования динамики озонных дыр и др.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Курик М. Людина й ультрафіолет.— Київ: Рада, 2003.
2. Метрологическое обеспечение безопасности труда. Т.1.— М.: Изд-во стандартов, 1989.
3. Kerr J. B., McElroy T. C. Evidence large upward trends ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion // Science.— 1993.— Vol. 262.— P. 1032—1034.
4. www.kippzonen.com
5. http://www.ndt.ua.com/uploaded/803 DX365XA.pdf
6. Компания «Октава+». Приборы санитарного и экологического контроля. Каталог.— 2004.
7. Каталог Cole-Parmer Instrument Co.— 2001/2002.
8. http://www.apogee-inst.com
9. http://www.tka.spb.ru
10. http://www.tenzor.org.ua
11. Шабашкевич Б. Г., Назаренко А. А., Годованюк В. І та ін. Дослідження фотоелектричних параметрів приймачів, чутливих в ультрафіолетовому діапазоні // Український метрологічний журнал.— 2004.— Вип. 1.— С. 33—36.
12. Malik A., Seco A., Fortunator E. et al. A new high ultraviolet sensitivity FTO-GaP Schottky photodiode fabricated by spray pyrolysis // Semicond. Sci. Technol.— 1998.— Vol. 13.— P. 102—107.
13. Пат. 71544 України. Фотодіод для ультрафіолетової області спектра / А. І. Малік, Б. Г. Шабашкевич, С. І. Пироженко.— 2004.— Бюл. № 12.
14. Декл. пат. 7145 України. Спосіб виготовлення поверхнево-бар'єрного фотодіоду / Б. Г. Шабашкевич, С. І. Пироженко, Ю. Г. Добровольський.— 2004.— Бюл. № 6.
15. Купко А. Д., Назаренко Л. А., Шабашкевич Б. Г. О необходимости создания интеллектуальных УФ радиометров // Метрология.— 2002.— № 2.— С. 20—22.
16. Заявка на пат. України 200500121 від 04.01 2005. Радиометр енергетичної освітленості ультрафіолетового діапазону / В. К. Бутенко, Ю. Г. Добровольський, С. І. Пироженко та ін.