



ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ СПЛОШНОГО СПЕКТРА

С.Г.Киреев, kireevsg@mail.ru, В.П.Архипов,
С.Г.Шашковский, Н.П.Козлов, ООО "Научно-произ-
водственное предприятие "Мелитта"

В статье описана методика измерения спектрального распределения энергии излучения импульсных источников света сплошного спектра. Методика апробирована на измерении импульса излучения длительностью 120 мкс.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное расширение сфер применения источников искусственного излучения в повседневной жизни лишний раз показывает значимость источников света в нашей жизни. Источники излучения (ИИ) используются в таких сферах, как освещение, кинопроекционная техника, управление различными фотохимическими и фотобиологическими процессами, фототравление и фотолитография, создание электронных компонентов. В последние десятилетия широкое распространение получают импульсные ИИ сплошного спектра, используемые в кинопроекционной технике, фотографии, медицинской технике [1,2], накачке лазеров и т.д.

Для регистрации излучения ИИ непрерывного горения разработан достаточно широкий ряд метрологического оборудования и методик. Хорошо известны, например, успешно применяемые методы фотофизической, основанной на внутреннем или внешнем фотоэффекте, и фотохимической регистрации излучения, основанной на изменении оптических или физических свойств вещества под воздействием света [3]. Перечисленные методики позволяют получать достоверные результаты при регистрации источ-

MEASUREMENT OF SPECTRAL AND ENERGY CHARACTERISTICS OF PULSED RADIATION SOURCES OF CONTINUOUS SPECTRUM

S.G.Kireev, kireevsg@mail.ru, V.P.Arhipov,
S.G.Shashkovsky, N.P.Kozlov, LLC "Scientific and
Production Enterprise "Melitta"

The method of measuring spectral distribution of the radiation energy of pulsed light sources of continuous spectrum is described in the article. The method is tested on a radiation pulse with a duration of about 120 μ s.

INTRODUCTION

The constant expansion of the spheres of application of artificial radiation sources in everyday life once again shows the importance of light sources in our life. Radiation sources (RS) are used in such spheres as lighting, film projection technology, control of various photochemical and photobiological processes, photo etching and photolithography, creation of electronic components. In recent decades, pulsed RSs of the continuous spectrum, used in film projection technology, photography, medical technology [1,2], laser pumping, etc., have been widely used.

A fairly wide range of metrological equipment and techniques has been developed for recording the radiation from continuous combustion RSs. For example, successfully applied photophysical methods based on the internal or external photoelectric effect, and photochemical recording of radiation based on changes in the optical or physical properties of a substance under the influence of light are well-known [3]. The above methods make it possible to obtain reliable results when recording sources of continuous combustion, in particular, linear or monochrome emission spectra. However, recording the RSs of the pulsed continuous spectrum causes difficulties and leads to significant errors.

The need to determine the quantum yield of the reaction as a function of the spectral composition of the radiation, the requirements for the thermal stability of the material used, the impossibility of using the substance repeatedly, and the practical inapplicability of existing actinometers to detect short-wave ultraviolet (UV) radiation in the range 200–240



ников непрерывного горения, в особенности линейчатого или монохромного спектров излучения. Однако регистрация ИИ сплошного спектра импульсного характера вызывает трудности и приводит к существенным погрешностям.

Необходимость определения квантового выхода реакции в зависимости от спектрального состава излучения, требования по термостабильности используемого материала, невозможность использования вещества повторно, а также практическая непригодность существующих актинометров для регистрации коротковолнового ультрафиолетового (УФ) излучения в диапазоне 200–240 нм [4] делают фотохимический метод регистрации трудоемким и малоприменимым.

Наибольшее распространение среди устройств на основе фотофизического метода регистрации излучения получили фотодиоды, принцип работы которых основан на появлении ЭДС при освещении поверхности полупроводника. Удобство в применении, повторяемость результатов, быстродействие, а также широкая линейка предлагаемых фотодиодов на различные спектральные диапазоны от таких известных фирм, как Sglux и Hamamatsu, заставляют обратить на эту область пристальное внимание. Основное применение: измерение облученности, создаваемой на приемной поверхности от таких распространенных монохроматических источников излучения, как ртутные лампы низкого давления, эксимерные лампы, лазеры. В этом случае, пренебрегая фактом уширения спектральных линий, с учетом известной абсолютной чувствительности фотоприемника на длине волны излучения K_λ в Вт/м²·В и зарегистрированным значением сигнала с фотодатчика U в вольтах вычисляется значение облученности $E = K_\lambda \cdot U$. Учет спектрального уширения линий и относительной спектральной характеристики фотоприемника позволяют поднять точность измерения.

Однако измерение облученности от ИИ полихромного характера вносит значительные погрешности за счет невозможности учета спектрального распределения излучения по спектру.

Для измерения мощности излучения лазеров часто используют пироэлектрические датчики, принцип работы которых основан на возникновении электрического поля в кристалле при изменении его температуры. Хорошая чувствительность и стабильность показаний обеспе-

чивают [4] сделать фотохимический метод регистрации трудоемким и неприменимым.

Самым распространенным среди устройств на основе фотофизического метода регистрации излучения являются фотодиоды, принцип работы которых основан на появлении ЭДС при освещении поверхности полупроводника. Удобство в применении, повторяемость результатов, скорость, а также широкий диапазон предлагаемых фотодиодов для различных спектральных диапазонов со стороны таких известных компаний, как Sglux и Hamamatsu, заставляют обратить на эту область пристальное внимание. Основное применение: измерение облученности, создаваемой на приемной поверхности от таких распространенных монохроматических источников излучения, как лампы низкого давления, эксимерные лампы, лазеры. В этом случае, пренебрегая фактом уширения спектральных линий, с учетом известной абсолютной чувствительности фотодетектора на длине волны излучения K_λ в Вт/м²·В и зарегистрированным значением сигнала с фотодатчика U в вольтах вычисляется значение облученности $E = K_\lambda \cdot U$. Учет спектрального уширения линий и относительной спектральной характеристики фотодетектора позволяют повысить точность измерения.

Однако измерение облученности от ИИ полихромного характера вносит значительные погрешности из-за невозможности учета спектрального распределения излучения по спектру.

Пироэлектрические датчики часто используются для измерения мощности излучения лазеров, принцип работы которых основан на возникновении электрического поля в кристалле при изменении его температуры. Хорошая чувствительность и стабильность показаний обеспечивают [4] сделать фотохимический метод регистрации трудоемким и неприменимым.

В зависимости от использования пироэлектрического датчика для измерения излучения импульсного источника, существует ряд ограничений. Во-первых, помимо самого датчика, необходимо приобрести специальное компьютеризированное устройство, которое обрабатывает сигнал с датчика и учитывает его калибровочные параметры. Стоимость такого набора часто превышает 4000 долларов США. Во-вторых, датчик подвержен воздействию любых источников излучения, попадающих в его спектральный диапазон чувствительности. При работе с достаточно мощным источником, любые нагревательные элементы

чили пироэлектрическим датчикам широкое распространение в сфере измерения мощности лазеров. На текущий день ряд компаний предлагает пироэлектрические головки с широким диапазоном энергетической чувствительности, временным разрешением, спектральным диапазоном (рис.1). Более того, заложенные в обрабатывающий компьютер алгоритмы позволяют выбирать длину волны лазера, тем самым учитывая спектральную чувствительность, что значительно повышает удобство работы с датчиком. Все перечисленные факты позволяют подбирать приемник в зависимости от параметров ИИ.

С точки зрения использования пироэлектрического датчика для измерения излучения импульсного ИИ существует ряд ограничений. Во-первых, помимо самого датчика необходимо приобретать специальное компьютеризированное устройство, обрабатывающее сигнал с датчика и учитывающее его калибровочные параметры. Стоимость такого набора зачастую превышает 4000 долларов США. Во-вторых, на датчик оказывают влияние любые источники излучения, попадающие в спектральный диапазон его чувствительности. При работе с достаточно мощными ИИ любые нагревающиеся элементы (например электроды, колба) посредством излучения в ИК-диапазоне будут вносить существенную погрешность в проводимые измерения. В-третьих, в отличие от фотодиодных приемников излучения, превышение пороговой плотности энергии приводит к повреждению чувствительной поверхности и изменению ее характеристик. В-четвертых, при регистрации излучения сплошного спектра необходима постоянная спектральная чувствительность датчика. Для приемника с головкой ВВ Pyro (рис.1), обладающей наиболее постоянной чувствительностью, максимальный перепад составляет $\approx 8\%$, что вносит дополнительную погрешность в результат измерений. В-пятых, отсутствует возможность получения энергетических характеристик в определенных спектральных

(e.g., electrodes, bulb) will introduce a significant error in the measurements by means of radiation in the infrared range. Third, unlike photodiode receivers of radiation, exceeding the threshold energy density leads to damage to the sensitive surface and to a change in its characteristics. Fourth, when recording the radiation of continuous spectrum, a constant spectral sensitivity of the sensor is necessary. For the receiver with the BB Pyro head (Fig. 1), which has the most constant sensitivity, the maximum difference is $\approx 8\%$, which introduces an additional error in the measurement result. Fifth, there is no possibility of obtaining energy characteristics in certain spectral ranges, even considering the possibility of using optical glasses.

None of the methods listed above makes it possible to obtain reliable results of measuring the radiation parameters of continuous spectrum pulsed radiation sources in view of, at least, spectral energy distribution.

The energy distribution over the radiation spectrum can be taken into account in the RSs subject to the approximation of absolutely black body (black body). In this case, the energy brightness measured [6] makes it possible to construct the emission spectrum and, considering the known relative spectral sensitivity of the photodetector, to calculate the characteristics of the radiation incident on the photodetector pad. The departure from the black body approximation and, often, the complexity of

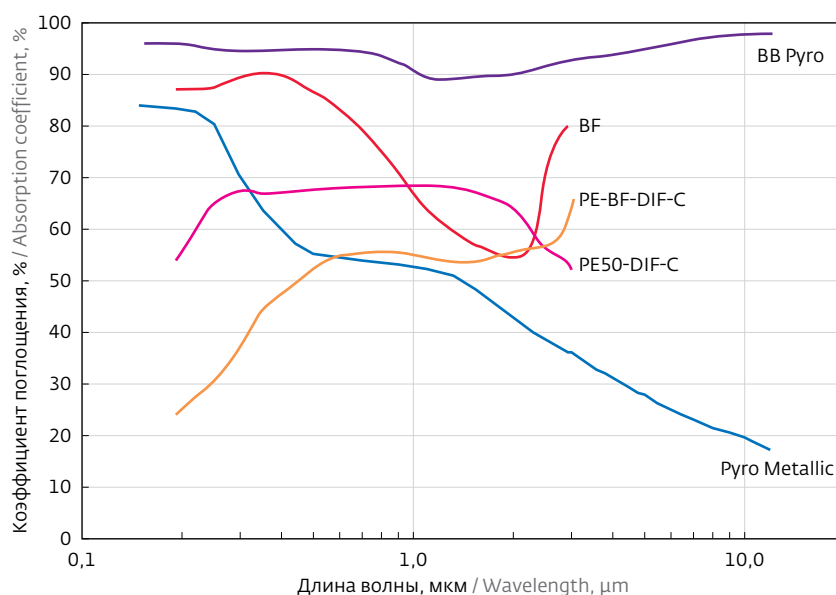


Рис.1. Спектральная чувствительность приемных датчиков компании Ophir [5]
Fig. 1. Spectral sensitivity of Ophir receiving sensors [5]

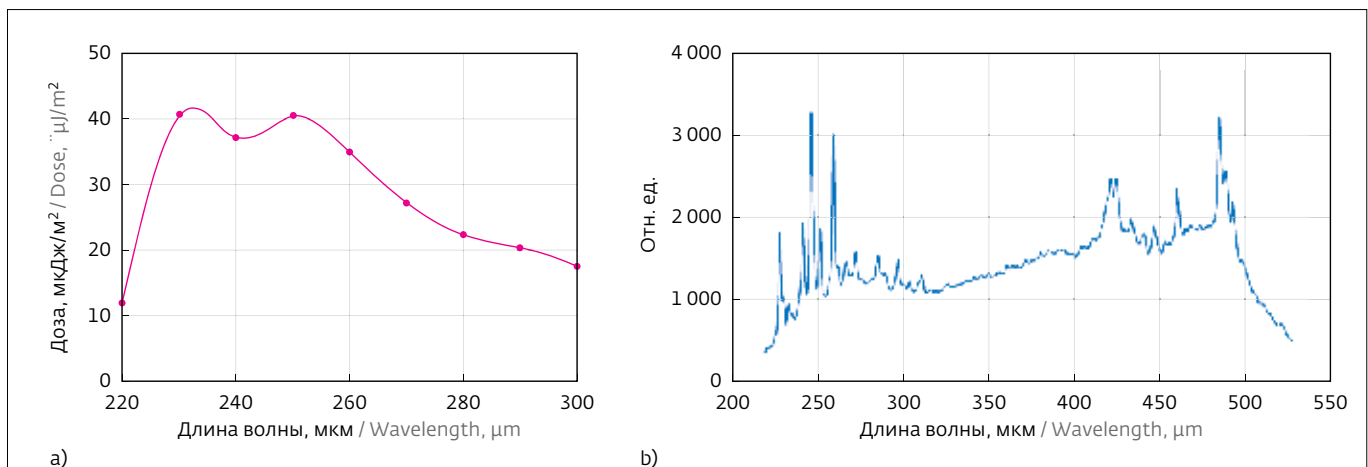


Рис.2. Спектральное распределение энергетической освещенности, полученное: а) при использовании монохроматора и пьезоэлектрического датчика; б) при использовании спектрометра Ocean Optics

Fig. 2. Spectral distribution of energy illumination, obtained: a) using a monochromator and a pyroelectric sensor; b) using an Ocean Optics spectrometer

диапазонах, даже с учетом возможности применения оптических стекол.

Ни один из перечисленных выше методов не позволяет получить достоверные результаты измерения параметров излучения импульсных источников излучения сплошного спектра в виду, как минимум, непринятия во внимания спектрального энергетического распределения.

Энергетическое распределение по спектру излучения можно учесть у ИИ, подчиняющихся приближению абсолютно черного тела (АЧТ). В этом случае, измеряемая [6] энергетическая яркость дает возможность построить спектр излучения и, с учетом известной относительной спектральной чувствительности фотоприемника, вычислить характеристики падающего на фотоприемную площадку излучения. Отхождение от приближения АЧТ и, зачастую, сложность измерения энергетической яркости источников со свободно расширяющимся телом излучения [7] вносят существенные погрешности в получаемые на выходе параметры.

Известна методика измерения абсолютных значений энергетической освещенности с использованием совокупности монохроматора, выделяющего узкий спектральный диапазон, и пьезоэлектрического датчика. Авторы статьи [8], выделяя монохроматором из спектра излучения последовательно участки диапазоном 10 нм, облучали приемную площадку пьезоэлектрического приемника излучения, полу-

measuring the energy brightness of sources with a freely expanding radiation body [7], introduce significant errors in the output parameters.

A technique is known for measuring absolute values of energy illumination using a combination of a monochromator that emits a narrow spectral range and a pyroelectric sensor. The authors of article [8], consistently isolating 10-nm range sections from the emission spectrum using a monochromator, irradiated the receiving area of the pyroelectric radiation detector, thereby obtaining energy illumination at the sensor level with a step of 10 nm (Fig. 2a).

However, this technique creates several problems. A slight discrepancy in the form of the spectra of energy illumination (Fig. 2) is due to the unstable sensitivity of the receiving head of the pyroelectric sensor. A more significant disadvantage is the time spent on obtaining the spectrum of energy illumination: to obtain a spectral distribution in the 80-nm range, the authors were forced to repeat the radiation detection operation 8 times. An increase in the accuracy of registration, and therefore a decrease in the spectral step, will lead to a proportional increase in the number of operations and time to obtain the result.

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE METHOD

As an alternative method of obtaining absolute characteristics of radiation from the continuous spectrum, it is suggested to use a set of obtained data from a spectrometric device recording the spectral

чая тем самым энергетическую освещенность на уровне датчика с шагом в 10 нм (рис.2а).

Однако данной методике присущи несколько недостатков. Незначительное расхождение в форме спектров энергетической освещенности (рис.2) связано с непостоянной чувствительностью приемной головки пироэлектрического датчика. Более значительным недостатком является время, затрачиваемое на получение спектра энергетической освещенности: для получения спектрального распределения в диапазон 80 нм авторы были вынуждены 8 раз повторять операцию регистрации излучения. Увеличение точности регистрации, а следовательно, уменьшение спектрального шага приведет к пропорциональному росту количества операций и времени на получение конечного результата.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ

В качестве альтернативного способа получения абсолютных характеристик излучения сплошного спектра предлагается использовать совокупность получаемых данных со спектрометрического устройства, регистрирующего спектральное распределение оптического сигнала посредством его разложения на дисперсионном элементе и последующей фокусировке на фоточувствительной матрице, и фотофизического приемника излучения на основе фотодиода (ФПИФ) с RC-цепью, напряжение на выходе которой равно интегралу тока зарядки конденсатора.

Основное преимущество спектрометра – программный учет производителем спектральной чувствительности фотоприемной площадки, что позволяет говорить о независимости его чувствительности от длины волны. Таким образом, спектрометр позволяет получить реальное спектральное распределение приходящего излучения в относительных единицах.

Подбор спектрометра основан на трех основных требованиях: спектральная чувствительность устройства должна попадать в спектральный диапазон излучения лампы, время интегрирования должно значительно превышать длительность импульса излучения, чувствительность приемной матрицы не должна насыщаться падающим излучением.

Фотодиодный приемник подбирается исходя из требований о превышении посто-

distribution of the optical signal by its decomposition on the dispersion element and the focusing on the photosensitive matrix, and a photodiode-based photophysical receiver (PBPR) with a RC-circuit with the output voltage equal to the integral of the charging current of the capacitor.

The main advantage of the spectrometer is that the manufacturer considers the spectral sensitivity of the photodetector pad, which makes it possible to speak of the independence of its sensitivity of the wavelength. Thus, the spectrometer makes it possible to obtain the real spectral distribution of the incoming radiation in relative units.

The choice of the spectrometer is based on three basic requirements: the spectral sensitivity of the device must fall within the spectral range of the lamp radiation, the integration time must significantly exceed the pulse length, the sensitivity of the receiving matrix must not be saturated with the incident radiation.

The photodiode receiver is selected based on the requirements for exceeding the RC-chain time constant over the duration of the radiation pulse, but less than the flare period and on the occurrence of the spectral sensitivity of the PBPR in the spectral range of the radiation detection by the spectrometer.

The PBPR, depending on the spectral sensitivity range, is first verified by the approved method [9], [10], which provides the spectral distribution of the relative sensitivity S_λ , normalized to its maximum value, and the value of the volt sensitivity, which characterizes it in relation to the circuit of switching

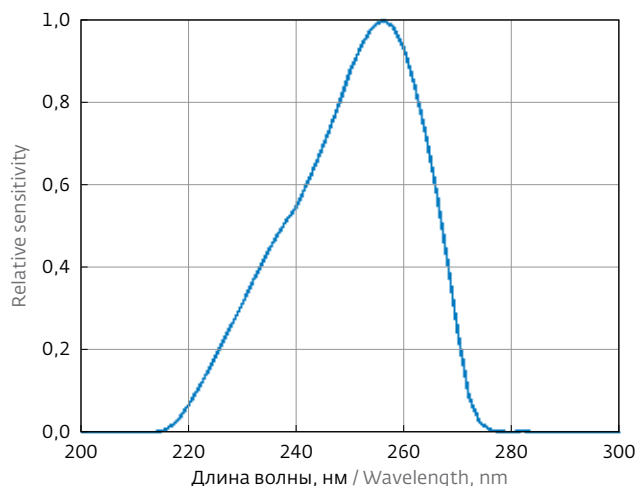


Рис.3. Спектральное распределение относительной чувствительности ФПИФ ТОСОН_С6
Fig. 3. Spectral distribution of the relative sensitivity of the PBPR TOCON_C6

янной времени RC-цепи над длительностью импульса излучения, но меньшим периода всплесков и о вхождении спектральной чувствительности ФПИФ в спектральный диапазон регистрации излучения спектрометром.

ФПИФ в зависимости от спектрального диапазона чувствительности предварительно проверяется по утвержденной методике [9], [10], обеспечивающей получение спектрального распределения относительной чувствительности S_λ , нормированной на его максимальное значение, и значения вольтовой чувствительности, характеризующей ее применительно к схеме включения приемника, на длине волны максимума чувствительности S_{\max} [$\text{В} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$].

Фотоприемники располагаются на удалении достаточном для попадания всего ИИ в эффективное поле зрения приемника таким образом, чтобы можно было пренебречь косинусом угла падения излучения на фоточувствительные поверхности.

Запишем уравнение RC-цепи, выразив сигнал, получаемый на выходе, через реакцию фотодиодной площадки [11]:

$$U_{\text{RC}} = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{t_1}^{t_2} U_{\text{BX}} dt, \quad (1)$$

где U_{RC} – сигнал на выходе RC-цепи, В; U_{BX} – сигнал на входе RC-цепи, В; τ – постоянная времени цепи, с; t_1 – моменты времени, характеризующие начало импульса излучения и окончание.

Выразим, реакцию ФПИФ на входе RC-цепи через падающее спектральное распределение мощности излучения с учетом нормированной относительной чувствительности:

$$U_{\text{BX}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda, t) \cdot S(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $\Phi(\lambda, t)$ – спектральная освещенность, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{нм})$; $S_\lambda(\lambda)$ – распределение нормированной относительной чувствительности датчика; λ_1 и λ_2 диапазоны длин волн в пределах спектральной чувствительности датчика.

Учитывая, что временной интеграл спектрального распределения облученности есть энергетическая освещенность, подставляем (2) в (1) и с учетом известного значения вольтовой чувствительности ФПИФ выражаем интеграл спектрального распределения энергетического излучения:

on the receiver, at the wavelength of the maximum sensitivity S_{\max} [$\text{В} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$].

The photodetectors are located at a distance sufficient to hit the entire RS in the effective field of view of the receiver in such a way that the cosine of the angle of incidence of the radiation on the photosensitive surfaces can be neglected.

Let us write down the RC-circuit equation by expressing the signal obtained at the output through the photodiode pad reaction [11]:

$$U_{\text{RC}} = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{t_1}^{t_2} U_{\text{BX}} dt, \quad (1)$$

where U_{RC} is the signal at the RC-circuit output, V; U_{in} is the signal at the RC-circuit input, V; τ is the time constant of the chain, s; t_1 are the instants of time characterizing the beginning of the radiation pulse and the termination, s.

Let us express the PBPR reaction at the RC-circuit input through the incident spectral distribution of the radiation power, taking into account the normalized relative sensitivity:

$$U_{\text{BX}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda, t) \cdot S(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

where $\Phi(\lambda, t)$ is the spectral illuminance, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$; $S_\lambda(\lambda)$ is the distribution of the normalized relative sensitivity of the sensor; λ_1 and λ_2 are the wavelength ranges within the spectral sensitivity of the sensor.

Considering that the time integral of the spectral distribution of irradiance is the energy illumination, we substitute (2) in (1) and, taking into account the known value of the volt sensitivity of the PBPR, we express the integral of the spectral distribution of the energy radiation:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda = \frac{U_{\text{RC}} \cdot \tau}{S_{\max}}, \quad (3)$$

where $E(\lambda)$ is the spectral distribution of the energy illumination, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$.

The reaction spectrometer is proportional to the incident radiation:

$$E(\lambda) = K_{\text{спек}} \cdot E_{\text{спек}}(\lambda), \quad (4)$$

where $K_{\text{спек}}$ is the coefficient of proportionality of the reaction of the spectrometer, $\text{J}/\text{ref.unit}$; $E_{\text{спек}}(\lambda)$ is the reaction of the spectrometer to the incoming spectral distribution of the energy illumination, $\text{ref.unit}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$. By substituting (4) into (3) and expressing $K_{\text{спек}}$, we obtain:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda = \frac{U_{RC} \cdot \tau}{S_{max}}, \quad (3)$$

где $E(\lambda)$ – спектральное распределение энергетической освещенности, Дж/(м²·нм).

Реакция спектрометра пропорциональна падающему излучению:

$$E(\lambda) = K_{спек} \cdot E_{спек}(\lambda), \quad (4)$$

где $K_{спек}$ – коэффициент пропорциональности реакции спектрометра, Дж/отн. ед.; $E_{спек}(\lambda)$ – реакция спектрометра на приходящее спектральное распределение энергетической освещенности, отн. ед/(м²·нм). Подставляя (4) в (3) и выражая $K_{спек}$, получаем:

$$K_{спек} = \frac{U_{RC} \cdot \tau}{S_{max} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{спек}(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}. \quad (5)$$

Подставляя рассчитанное значение коэффициента пропорциональности в (4), получаем спектральное распределение энергетической освещенности, приходящей на приемную площадку спектрометра.

ПРИМЕР ПОЛУЧЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

В качестве ИИ сплошного спектра была рассмотрена трубчатая импульсная ксеноновая лампа с межэлектродным расстоянием 120 мм и внутренним диаметром – 5 мм. Оболочка лампы была изготовлена из кварцевого стекла с поглощением в УФ-С области не более 15%. Разрядный контур обеспечивал импульс излучения длительностью порядка 120 мкс.

Излучательные характеристики регистрировались с помощью оптоволоконного спектрометра просветленного типа с высокой чувствительностью в ультрафиолетовом диапазоне AvaSpec-ULS2048-USB и спектральной погрешностью не более 0,05 нм и ФПИФ UV Sensor "TOCON-C6", регистрирующим излучение в диапазоне 220–275 нм с максимумом чувствительности на 255 нм и постоянной времени 31,4 мс [12]. Для ФПИФ во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (ВНИОФИ) была заранее проведена калибровка и получены распределение относительной чувствительности S_λ , нормированной на максимальное значение (рис.3), и значение вольтовой чувствительности на длине волны 253,7 нм.

$$K_{спек} = \frac{U_{RC} \cdot \tau}{S_{max} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{спек}(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}. \quad (5)$$

By substituting the calculated value of the proportionality coefficient in (4), we obtain the spectral distribution of the energy illumination coming to the receiving area of the spectrometer.

EXAMPLE OF OBTAINING SPECTRAL AND ENERGY RADIATION DISTRIBUTION

As a continuous spectrum RS, a pulsed xenon flash lamp with an interelectrode distance of 120 mm and an inner diameter of 5 mm was studied. The lamp shell was made of quartz glass with absorption in the UV-C region of not more than 15%. The discharge circuit provided a radiation pulse with a duration of about 120 microseconds.

The radiative characteristics were recorded using a light-emitting optical fiber spectrometer with a high sensitivity in the ultraviolet range AvaSpec-ULS2048-USB and a spectral error of no more than 0.05 nm and an PBPR UV Sensor "TOCON-C6" recording radiation in the range of 220–275 nm with a maximum sensitivity of 255 nm and a time constant of 31.4 ms [12]. The PBPR was carried out in the All-Russian Scientific Research Institute of Optical and Physical Measurements (ARSRIOPM) in advance, and a distribution of the relative sensitivity S_λ normalized to the maximum

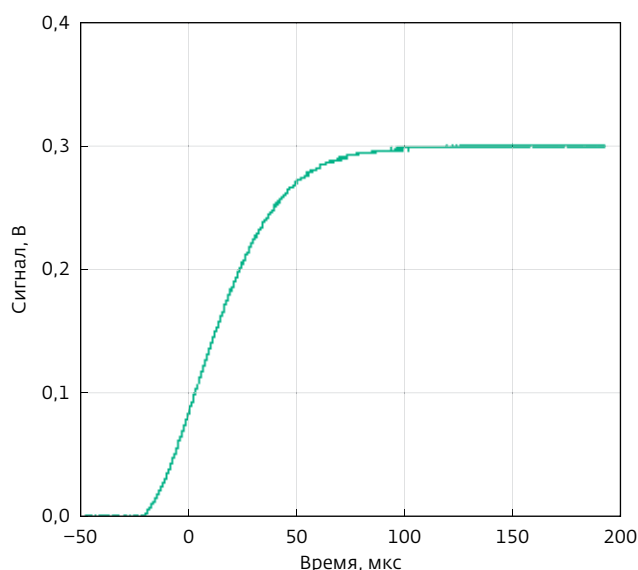


Рис.4. Осциллограмма, полученная с ФПИФ TOCON_C6
Fig. 4. Oscillograph pattern obtained with the PBPR TOCON_C6

U_{RC} , снимаемое с осциллограммы импульса излучения с ФПИФ (см. рис.4), составило 0,3 В. Относительное спектральное распределение, зарегистрированное спектрометром с учетом нормированной относительной чувствительности ФПИФ, приведено на рис.5.

Подстановка интеграла спектрального распределения излучения с учетом относительной чувствительности ФПИФ, вольтовой чувствительности, сигнала максимума излучения с ФПИФ и постоянной времени в формулу (6) позволяет рассчитать значение коэффициента калибровочного коэффициента для спектрометра $K_{спек}$. Вычисляя по формуле (5) значение энергетической освещенности и учитывая расстояние до ИИ, получаем спектральное распределение энергетической светимости в единице телесного угла импульсной ксеноновой лампы (рис.6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что фотодиодный приемник регистрировал излучения в относительно узком спектральном диапазоне, удалось добиться получения абсолютных значений спектрального распределения энергии в более широком диапазоне регистрации спектрометра.



Рис.5. Спектральное распределение плотности энергии
Fig. 5. Spectral distribution of energy density

value (Fig. 3) and the value of the volt sensitivity at a wavelength of 253.7 nm were obtained.

U_{RC} taken from the radiation pulse oscillograph pattern using PBPR (see Fig. 4) was 0.3 V. The relative spectral distribution recorded by the spectrometer

Получена и апробирована методика измерения спектрального распределения энергии излучения импульсных источников света сплошного спектра. Методика отличается простотой, надежностью предварительной калибровки и оперативностью получения результата. Методика апробирована на импульсе излучения длительностью порядка 120 мкс, однако может быть использована для регистрации как более коротких, так и более длительных импульсов, так как ограничена исключительно временным разрешением используемого оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zain Husain, Tina S Alster.** The role of lasers and intense pulsed light technology in dermatology. – Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology, 2016, v. 9, p. 29–40.
2. **Камруков А.С., Козлов Н.П., Ушаков И.Б., Шашковский С.Г.** Разработка и внедрение импульсных плазменно-оптических технологий и установок в космическую медицину и практическое здравоохранение. – Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2011, с. 107–120.
3. **Шашлов А.Б.** Основы светотехники. – М.: Логос, 2011.
4. **Бойченко А.М., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.** Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика и техника применения. – Томск: STT, 2011.
5. Absorption and Damage Graphs for Pyroelectric Sensors // Ophir. URL: http://www.ophiropt.com/laser-measurement/sites/default/files/pyroelectric_sensors_graphs_2.pdf
6. **Маршак И.С.** Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978.
7. **Камруков А.С., Киреев С.Г., Кулебякина А.И., Козлов Н.П., Шашковский С.Г., Яловик М.С.** Энергетические и спектрально-яркостные характеристики трехэлектродной импульсной ксеноновой лампы высокого давления. – Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. pp. 135–154.
8. **T. Wang, S. J. MacGregor, J. G. Anderson, G. A. Woolsey.** Pulsed ultra-violet inactivation spectrum of Escherichia coli. – Water Research. 2005. Vol. 39. p. 2921–2925.
9. ГОСТ 8.552-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений потока излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн от 0,03 до 0,40 мкм.
10. ГОСТ 8.195-2013. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения, спектральной плотности энергетической освещенности, силы излучения и энергетической освещенности.
11. **Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.** Основы теории цепей. – М.: Издательство "Энергия", 1975.
12. TOCON_C6 // Веб-сайт компании Sglux. URL: http://sglux.de/en/product/tocon_c6-en/

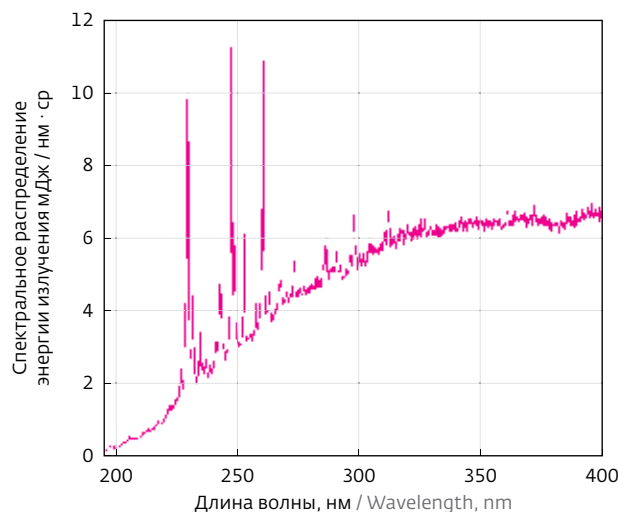


Рис.6. Спектральное распределение энергии излучения импульсной ксеноновой лампы
Fig. 6. Spectral distribution of radiation energy of a pulsed xenon lamp

taking into account the normalized relative sensitivity of the PBPR is shown in Fig. 5.

Substitution of the integral of the spectral distribution of radiation, taking into account the PBPR relative sensitivity, the volt sensitivity, the radiation maximum signal with the PBPR, and the time constant into formula (6), makes it possible to calculate the value of the coefficient of the calibration coefficient for the spectrometer K_{spec} . Calculating the value of the energy illumination by formula (5) and taking into account the distance to the RS, we obtain the spectral distribution of the energy luminosity per unit of solid angle of the pulsed xenon lamp (Fig. 6).

CONCLUSION

Even though the photodiode receiver registered the radiation in a relatively narrow spectral range, it was possible to obtain absolute values of the spectral energy distribution in a wider range of spectrometer registration.

A method of measuring the spectral distribution radiation energy of the continuous spectrum pulsed light sources is obtained and tested. The method is characterized by its simplicity, reliability of preliminary calibration and efficiency of obtaining the result. The method is tested on a radiation pulse with a duration of about 120 μs , but it can be used to record both shorter and longer pulses, since it is limited only by a temporary resolution of the equipment used.