

Мультиспектральные фотоэлектрические преобразователи для измерения излучательных характеристик импульсных источников широкополосного оптического излучения

В. П. Архипов, И. А. Желаев, А. Б. Ивашкин, А. С. Камруков, К. А. Семенов

Сообщается о разработке эффективных средств комплексного измерения спектрально-энергетических и динамических характеристик импульсных источников широкополосного оптического излучения. Приведены сведения о конструкции, характеристиках, методиках калибровки и особенностях применения фотоэлектрических измерительных преобразователей «Спектр», предназначенных для экспериментальных исследований и спектральных измерений в лабораторных и полигонных условиях.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, импульсный источник излучения, спектральные характеристики, широкополосное излучение, методика измерений.

Введение

Разработка и исследования импульсных источников излучения, к которым традиционно относят импульсные газоразрядные лампы с длительностью импульсов 5 мкс – 5 мс [1] и источники взрывного и пиротехнического типа с длительностью импульсов 10 мкс – 100 мс [2, 3], требуют регистрации и контроля излучательных характеристик (силы излучения, яркости, энергии импульса излучения, эквивалентных температур излучения и др.) в различных спектральных интервалах и в разные моменты времени.

Стандартным прибором для таких измерений является спектрометр на основе дифракционной решетки и линейки фотодиодов [4, 5]. Примером успешного применения спектрометра для определения характеристик импульсных ксеноновых ламп могут служить работы [6–8]. Однако такого типа спектрометры позволяют регистрировать интегральный по времени спектр излучения, полученный за время, в течение которого отдельные чувствительные элементы приемной матрицы

накапливают энергию в соответствующем спектральном интервале (время интегрирования). Исследование же динамических характеристик импульсных источников излучения спектрометрическими методами принципиально ограничено временным разрешением, равным минимальной длительности интегрирования спектрометра. Заметим, что популярные модели современных спектрометров [4, 5] характеризуются временем интегрирования 1–5 мс, что явно недостаточно для указанных исследований динамических характеристик. Кроме того, подобные характеристики по временному разрешению на практике зачастую не удается реализовать из-за недостаточной чувствительности матрицы спектрометра. Действительно, чтобы реально получить полный спектр излучения источника, время интегрирования приходится устанавливать значительно большим, чем минимальное возможное для данного прибора, т. к. в противном случае выходные электрические сигналы фотоприемной матрицы оказываются крайне невелики и фактически теряются в шумах.

В случае источника непрерывного излучения проблема решается простым увеличением длительности интервала интегрирования спектрометра, в течение которого на фоточувствительных элементах накапливается заряд, достаточный для уверенной регистрации спектра излучения. Для импульсных источников излучения зачастую такой возможности нет, к тому же часто экспериментатор вообще имеет дело с одиночным импульсом излучения (например, в случае взрывного источника излучения).

В результате можно констатировать, что применительно к импульсным источникам излу-

Архипов Владимир Павлович, ведущий инженер.
Желаев Илья Анатольевич, научный сотрудник.
Ивашкин Анатолий Борисович, доцент.
Камруков Александр Семенович, зав. отделом.
Семенов Кирилл Андреевич, ведущий инженер.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет).
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская 5, стр. 1.
Тел. 8 (499) 263-69-19. E-mail: kamrukov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 6 марта 2017 г.

© Архипов В. П., Желаев И. А., Ивашкин А. Б.,
Камруков А. С., Семенов К. А., 2017

чения современный малогабаритный спектрометр может быть полезен, например, для исследования структуры линий в режиме накопления повторяющихся импульсов излучения. В то же время для исследования динамики изменения спектральных характеристик в процессе развития импульса излучения, в том числе одиночных или редко повторяющихся, применение таких приборов, по меньшей мере, проблематично. Здесь эффективной альтернативой может служить одновременная многоканальная фотоэлектрическая регистрация исследуемых процессов с использованием в каждом независимом приемном канале быстродействующего фотоэлектрического приемника с соответствующим спектральным фильтром [9]. При этом регистрация, запоминание и преобразование аналоговых выходных сигналов приемных каналов осуществляется с помощью цифровых осциллографов.

В настоящей работе сообщается о разработке приборов для комплексного измерения спектрально-энергетических и динамических характеристик импульсных источников широкополосного оптического излучения. Приводятся сведения о конструкции, характеристиках, методиках калибровки и особенностях применения фотоэлектрических измерительных преобразователей «Спектр», предназначенных для экспериментальных исследований и спектральных измерений в лабораторных и полигонных условиях.

Измерительные приборы и методика калибровки

Внешний вид разработанных спектральных приборов показан на рис. 1. Измерительный фотоэлектрический преобразователь «Спектр-01» (рис. 1, а) имеет 6 независимых приемных каналов для регистрации потоков импульсного излучения в различных спектральных интервалах:

- канал № 1 для регистрации ультрафиолетового (УФ) излучения на базе вакуумного фотоэлемента Ф-29 со светофильтром УФС1 (3 мм); спектральный диапазон чувствительности на полувысоте 250–290 нм с центром на длине волны 270 нм;
- канал № 2 для регистрации видимого излучения в синей области спектра на основе кремниевого фотодиода ФД-263 со светофильтрами СС15 (2,2 мм) и СЗС22 (3 мм); спектральный диапазон чувствительности на полувысоте 380–480 нм с центром на длине волны 430 нм;
- канал № 3 для регистрации видимого излучения в зеленой области спектра (области максимальной чувствительности глаза) на основе кремниевого фотодиода ФД-263 со светофильтра-

ми ЖС18 (3,2 мм) и СЗС21 (2 мм); спектральный диапазон чувствительности на полувысоте 505–605 нм с центром на длине волны 555 нм (кривая спектральной чувствительности приближена к кривой видности);

- канал № 4 для регистрации ближнего инфракрасного (ИК) излучения на основе кремниевого фотодиода ФД-263 со светофильтром ИКС6 (3,2 мм); спектральный диапазон чувствительности на полувысоте 930–1070 нм с центром на длине волны 1000 нм;
- канал № 5 для регистрации энергии излучения интегрального спектра на основе пироэлектрической керамики цирконат-титанат свинца ЦТС-19 со специальным покрытием; спектральный диапазон чувствительности 190–12000 нм (спектральный аналог абсолютно черного тела).
- канал № 6 для синхронизации измерительной аппаратуры на основе кремниевого фотодиода ФД-263 без спектральной коррекции.



а



б

Рис. 1. Внешний вид разработанных фотоэлектрических преобразователей «Спектр-01» (а) и «Спектр-03» (б).

Каналы № 1–4 являются основными быстродействующими измерительными приборами. Каждый из них снабжен усилителем со ступенчатой регулировкой коэффициента усиления в 1, 10, 500, 5000 раз. Временное разрешение измерительных каналов – не хуже 1 мкс, диапазон линейности выходного сигнала – до 13 В, уровень шумов – не более 0,05 В. Осциллограммы с выхода каждого из измерительных каналов отражают изменение мгновенных значений энергетической облученности на входном зрачке в соответствующем спектральном интервале.

Канал № 5 – контрольный. Он служит для измерения энергии импульсов излучения в широ-

ком спектре, причем длительность ещё корректно регистрируемых импульсов – до 500 мкс.

Канал синхронизации № 6 выполнен с максимальным коэффициентом усиления и имеет на порядок более высокую чувствительность по сравнению с измерительными каналами. При таком исполнении на выходе канала синхронизации, как правило, формируется электрический сигнал с крутым передним фронтом и характерной для режима насыщения плоской вершиной. Запуск регистрирующей аппаратуры осуществляется по переднему фронту этого сигнала.

Спектральные характеристики быстродействующих измерительных каналов (каналы № 1–4) формируются абсорбционными светофильтрами и спектральными характеристиками чувствительности использованных фотоприемников в совокупности со абсорбционными светофильтрами. Результирующие спектральные характеристики каналов характеризуются шириной спектрального интервала в несколько десятков нм. Такое решение позволяет достичь достаточно высокой энергетической чувствительности измерительных каналов. Отметим, что использование для этих же

целей узкополосных интерференционных светофильтров с шириной спектрального интервала в несколько нанометров (вместо абсорбционных светофильтров) приводит к существенно меньшей величине энергетической чувствительности (как минимум, на порядок), а также к возможным погрешностям измерений, связанных с наличием у интерференционных фильтров неизбежных боковых крыльев пропускания.

Упрощенная электрическая схема одного из быстродействующих измерительных каналов преобразователя приведена на рис. 2. Нагрузкой фотодиода BL1 является резистор R1 при разомкнутых контактах электромагнитного реле K1 или параллельно включенные резисторы R1 и R2 при замкнутых контактах реле K1. Величины сопротивлений резисторов R1 и R2 подобраны таким образом, чтобы изменение чувствительности канала при замыкании и размыкании контактов реле K1 ступенчато изменялось от значения 1 (контакты 1 и 2 реле K1 замкнуты) до значения 500 (контакты 1 и 2 реле K1 разомкнуты). Управление реле K1 осуществляется клавишным переключателем «Усиление 1 – Усиление 500».

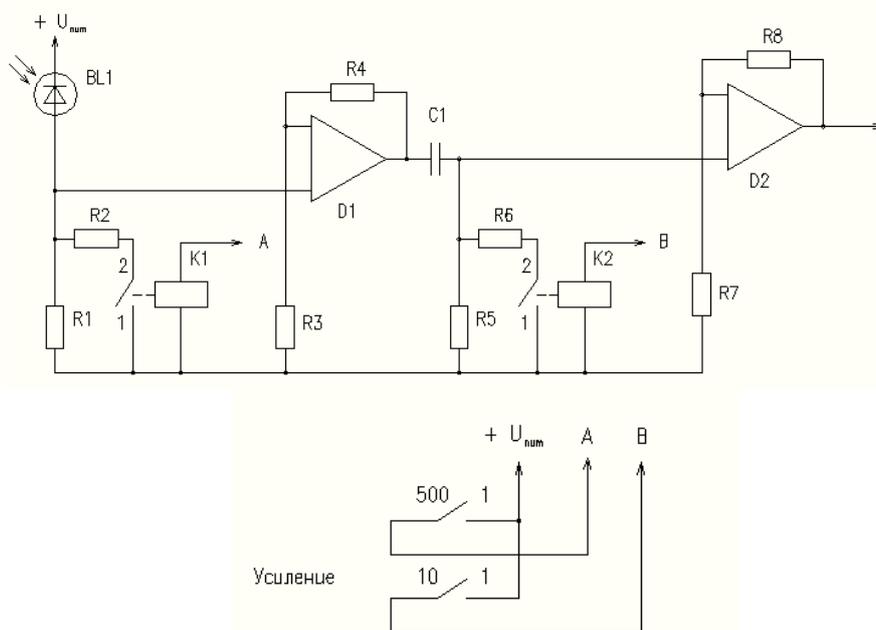


Рис. 2. Электрическая схема измерительного канала преобразователя «Спектр-01».

Выделенный на нагрузке фотодиода электрический сигнал, пропорциональный входному оптическому сигналу в соответствующем спектральном диапазоне, усиливается операционным усилителем на микросхеме D1, коэффициент усиления которого определяется резисторами R3 и R4. В выходной цепи операционного усилителя также имеется ступенчато меняющаяся нагрузка в виде резистора R5 или параллельно включенных резисторов R5 и R6. Коммутацию резисторов

осуществляет электромагнитное реле K2, управляемое клавишным переключателем «Усиление 1 – Усиление 10». Величины сопротивлений резисторов R5 и R6 подобраны соответствующим образом. Далее электрический сигнал усиливается усилителем на микросхеме D2, которая обеспечивает также согласование выходного сопротивления усилителя и высокочастотного кабеля, и затем подается на выходной разъем. Связь между усилительными каскадами – емкостная, через конденса-

тор С1. Такое решение обеспечивает минимум шумов и способствует достижению максимальной энергетической чувствительности прибора.

Ступенчатое изменение чувствительности измерительных каналов осуществляется синхронно за счет подключения соответствующих пар электромагнитных реле к одному или другому клавишному переключателю чувствительности. Обесточивание реле К1 обеспечивает включение режима усиления «500», обесточивание реле К2 обеспечивает усиление «10», одновременное обесточивание обоих реле приводит к общему усилению «5000».

Калибровка прибора осуществлялась в два этапа: на первом этапе определялась относительная спектральная характеристика чувствительности быстродействующих измерительных каналов на эталонной установке, включающей монохроматор МДР-23 и эталонные фотодиоды*, на втором осуществлялась абсолютная калибровка чувствительности каналов с использованием в качестве эталонов высокотемпературного импульсного капиллярного источника излучения ЭВ-45 (яркостная температура 41000 К в УФ- и сине-зеленой

части видимого диапазона спектра) и светоизмерительной лампы СИС 107–1500 (цветовая температура 2860 К в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра).

Калибровка канала № 5 проводилась по стандартизованному измерителю энергии импульсного излучения, а именно, по термометрическому калориметру ИМО-2.

Результаты калибровки многоканального фотоэлектрического преобразователя «Спектр-01» выражаются для каждого приемного измерительного канала при единичном усилении величиной энергетической чувствительности S в своем спектральном диапазоне в единицах $(В \text{ см}^2)/Вт$ для быстродействующих каналов № 1 – № 4 и в $(В \text{ см}^2)/Дж$ для интегрального канала № 5, а также величиной спектрального коэффициента чувствительности A_λ , приведенного к длине волны максимума спектральной чувствительности канала в $Вт/(В \text{ см}^2 \text{ нм})$. Пороговая чувствительность прибора в видимой области соответствует импульсной освещенности ~2 лк.

Калибровочные и основные технические характеристики прибора приведены в таблице.

Таблица

Технические характеристики фотоэлектрического преобразователя «Спектр-01»

Характеристика	«Спектр-01»	
Общее число независимых приемных каналов	6	
Чувствительность приемных измерительных каналов (при усилении 1):	$S, (В \times \text{см}^2)/Вт$	$A_\lambda, Вт/(В \times \text{см}^2 \times \text{нм})$
Ультрафиолетовый ($\lambda_{\text{max}} = 270 \text{ нм}$, $\Delta\lambda_{0,5} = 40 \text{ нм}$)	62,5	4×10^{-4}
Видимый I ($\lambda_{\text{max}} = 430 \text{ нм}$, $\Delta\lambda_{0,5} = 100 \text{ нм}$)	10	1×10^{-3}
Видимый II ($\lambda_{\text{max}} = 555 \text{ нм}$, $\Delta\lambda_{0,5} = 100 \text{ нм}$)	38,5	$2,6 \times 10^{-4}$
Инфракрасный ($\lambda_{\text{max}} = 1000 \text{ нм}$, $\Delta\lambda_{0,5} = 140 \text{ нм}$)	93	$7,68 \times 10^{-5}$
Интегральный ($\Delta\lambda = 0,2-12 \text{ мкм}$), $В \times \text{см}^2/Дж$	3570	
Канал синхронизации	есть	
Динамический диапазон измерений энергетической облученности	10^4	
Ступенчатое изменение чувствительности измерительных каналов	1; 10; 500; 5000	
Съемные ослабители оптического излучения	есть	
Временное разрешение, мкс, не хуже	0,5	
Длительность измеряемых импульсов, мкс	1,0–2000	
Питание	~220 В /12 В	
Потребляемая электрическая мощность, Вт	50	
Габариты, мм	350×250×120	
Масса, кг	3,5	

На рис. 1, б показан двухканальный измерительный преобразователь «Спектр-03». В отличие от прибора «Спектр-01», преобразователь «Спектр-03» способен регистрировать импульсы излучения с

медленно меняющимися интенсивностями, а также уровни постоянной оптической засветки. С этой целью усилители приемных измерительных каналов выполнены с гальванической связью между каскадами.

Приборы разработаны для применения в лабораторных и полигонных условиях и могут подключаться как к обычной сети электропитания 220 В 50 Гц, так и к встроенному источнику элект-

* Измерение относительных спектральных характеристик проводилось на эталонной установке в ФБУ «Ростест-Москва», относительная погрешность калибровки $\pm 8 \%$.

тропитания на основе аккумулятора и DC/DC преобразователя.

Эксперимент и обсуждение результатов

Применение многоканального фотоэлектрического преобразователя «Спектр-01» иллюстрируется примером измерения излучательных характеристик импульсной короткодуговой ксеноновой лампы. В экспериментах использовалась серийная шаровая ксеноновая лампа ДКсШ-3000 с межэлектродным расстоянием 7 мм и начальным (холодным) давлением ксенона 7×10^5 Па. Лампа, предназначенная для работы в режиме непрерывного горения с мощностью 3 кВт, использовалась в нестандартном, а именно, в импульсном режиме. Источником питания лампы являлся конденсатор емкостью 3 мкФ, заряжаемый до напряжения 1,65 кВ. Электрическая энергия вспышки ~ 4 Дж. Конденсатор заряжался от блока питания, обеспечивающего максимальную частоту следования разрядных импульсов – 60 Гц; средняя электрическая мощность на лампе до ~ 250 Вт. Инициирование разряда осуществлялось подачей на электроды лампы высоковольтного импульса, формируемого внешним по отношению к разрядному контуру импульсным трансформатором по схеме параллельного поджига. Для защиты блока питания в разрядном контуре устанавливались линейки обратных диодов, которые формировали в лампе униполярный импульс тока. Максимум разрядного тока в лампе составлял $I_{\max} \sim 1$ кА и достигался на 7-й мкс с момента инициирования, тогда как длительность токового импульса по уровню $(1/e) \times I_{\max} \sim 55$ мкс.

Излучение импульсной лампы регистрировалось многоканальным прибором «Спектр-01», выходные сигналы быстродействующих измерительных каналов подавались на цифровые осциллографы Tektronix TDS-1002B с полосой пропускания 60 МГц. При осциллографировании сигналов использовался режим усреднения по 128 импульсам.

Осциллограммы импульсов излучения лампы в различных спектральных диапазонах представлены на рис. 3. Можно видеть, что эффективная длительность импульсов излучения на полувысоте увеличивается с ростом длины волны регистрируемого излучения – в УФ-области она составляет ~ 11 мкс, в видимой – 15 ± 2 мкс, а в инфракрасной области ($\lambda \sim 1000$ нм) достигает ~ 85 мкс, что не противоречит известным экспериментальным данным по излучению импульсных шаровых ксеноновых ламп [1].

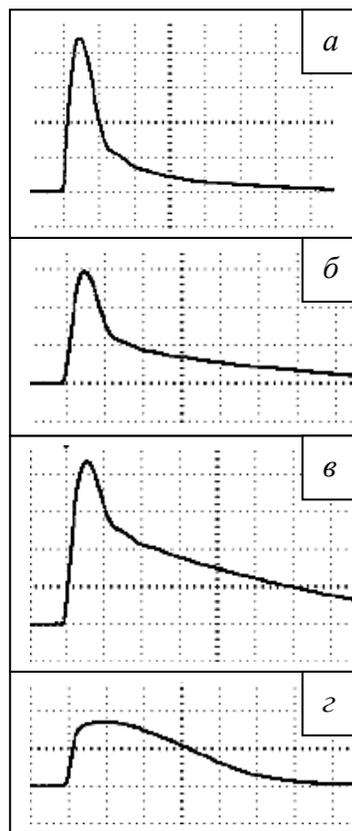


Рис. 3. Осциллограммы импульсов излучения ксеноновой короткодуговой лампы в различных областях спектра: а – $\lambda = 270 \pm 20$ нм; б – $\lambda = 430 \pm 50$ нм; в – $\lambda = 555 \pm 50$ нм; г – $\lambda = 1000 \pm 70$ нм. Развертка: а, б, в – 10 мкс/дел.; г – 25 мкс/дел.

Обработка полученных осциллограмм заключалась в вычислении величин спектральной облученности в соответствующих спектральных диапазонах $P_{s\lambda}(t)^*$ с использованием спектральных коэффициентов чувствительности A_λ :

$$P_{s\lambda}(t) = A_\lambda \times U_\lambda [\text{Вт}/(\text{см}^2 \text{ нм})],$$

а затем по известному удалению L точки фотометрирования от лампы вычислялись значения спектральных сил излучения:

$$I_\lambda(t) = P_{s\lambda}(t) \times L^2 [\text{Вт}/(\text{ср нм})].$$

При известных размерах тела свечения, в частности, площади его проекции на плоскость, перпендикулярную линии визирования (т. е. площади в «плане») – $S_o(t)$, по спектральным силам излучения $I_\lambda(t)$ рассчитываются усредненные по излучающей поверхности спектральные яркости излучения:

* Относительная погрешность определения величин спектральной плотности облученности и спектральной силы излучения составляет $\pm 10\%$.

$$B_{\lambda}(t) = I_{\lambda}(t)/S_{\sigma}(t) \text{ [Вт/(см}^2 \text{ ср нм)]},$$

по которым определяются яркостные температуры источника $T_{\lambda}(t)$:

$$B_{\lambda}(t) = B_{\lambda P}[T_{\lambda}(t)],$$

где $B_{\lambda P}(T)$ – спектральная яркость абсолютно черного тела с температурой T (функция Планка).

Интегральная по регистрируемому спектральному диапазону ($\Delta\lambda \approx 190\text{--}1100$ нм) сила излучения в выбранный момент времени (например, в максимуме излучения – t_m) определяется интегрированием полученного спектра по длинам волн:

$$I_{\Delta\lambda}(t_m) = \int I_{\lambda}(t_m) d\lambda \text{ [Вт/ср]}.$$

На рис. 4 представлены спектральные распределения силы излучения импульсной ксеноновой лампы в момент максимума мощности излучения ($t_m \approx 7$ мкс). Как можно видеть, во всей УФ-области спектра ($\lambda < 400$ нм) лампа излучает более 50 % генерируемой мощности, что указывает на высокотемпературный характер излучения. Интегральная по спектру сила излучения составляла $\sim 6,5$ кВт/ср при импульсной силе света $I = 683 \times I_{555}(t_m) \times \Delta\lambda_{0,5} \approx 0,5$ Мкд (здесь: 683 – коэффициент эквивалентности фотометрических и энергетических единиц измерения светового потока в лм/Вт; $I_{555}(t_m)$ – спектральная сила излучения лампы на длине волны $\lambda = 555$ нм; $\Delta\lambda_{0,5} \approx 100$ нм – полуширина полосы спектральной световой эффективности – полосы видности).

Интегрирование импульсов излучения по времени позволяет вычислить угловые спектральные плотности энергии – $E_{\lambda} = \int I_{\lambda}(t) dt$ [Дж/(ср нм)] и построить спектральные распределения энергии излучения лампы в импульсе $E_{\lambda}(\lambda)$, интегрирование которого по длинам волн дает полную энергию, излучаемую лампой в диапазоне $\Delta\lambda \approx 190\text{--}1100$ нм в единичном телесном угле – $E_{\Delta\lambda,\Omega}$ [Дж/ср]. Чем более равномерным является спектральное распределение энергии исследуемого источника, тем больше точность данной процедуры. К таким источникам излучения относятся импульсные лампы, мощные разряды в вакууме и газах, взрывные излучатели.

Проведение описываемых операций применительно к исследуемой ксеноновой лампе дало значение угловой плотности энергии излучения $E_{\Delta\lambda,\Omega} \approx 92$ мДж/ср. Полагая, согласно [1], эффективный телесный угол лампы $\Omega_0 \approx 11$ ср, получим полный энергетический выход излучения лампы $E_{\text{изл}} \approx 1$ Дж или 25 % от запасаемой электрической энергии, что согласуется с данными [1].

Сопоставление рассчитанной таким способом значения угловой плотности энергии излучения с измерениями каналом № 5, а также с независимым измерением энергии импульса излучения с помощью внешнего образцового измерителя калориметрического типа показывает, что разброс рассчитанных и измеренных значений не превышает 15 %. Таким образом, несмотря на то, что выделяемые быстродействующими измерительными каналами № 1–4 спектральные интервалы характеризуются значительной шириной (от 40 до 140 нм), результирующие энергетические величины определяются с практически приемлемой точностью. При этом обеспечивается необходимое сочетание быстродействия (временного разрешения получаемых спектров) и чувствительности.

Приведенное на рис. 4 распределение силы излучения относится к моменту времени, соответствующему максимуму импульса излучения. Понятно, что используя другие мгновенные значения выходных сигналов измерительных каналов прибора, можно определить аналогичные распределения для любого другого момента времени и тем самым получить необходимые данные для исследования динамики изменения излучательных характеристик импульсных источников излучения с временным разрешением не хуже 1 мкс.

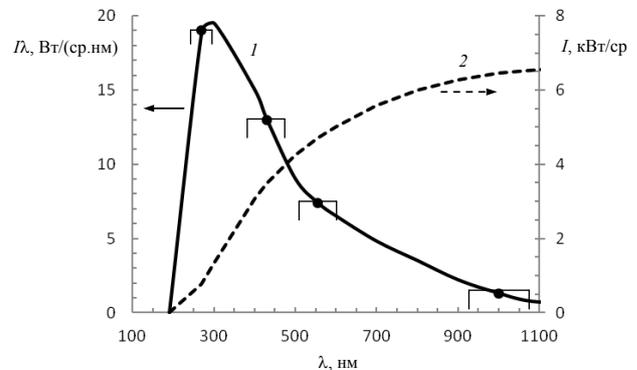


Рис. 4. Спектральные распределения силы излучения импульсной ксеноновой лампы в момент максимума мощности излучения ($t_m \approx 7$ мкс). 1 – спектральная сила излучения; 2 – интегральная сила излучения. Незамкнутыми прямоугольниками показаны области спектральной чувствительности фотоприемных каналов.

Разработанные средства измерения использованы для исследований спектрально-энергетических и динамических характеристик импульсных плазменных источников излучения различных типов [10], в том числе и взрывных плазменно-вихревых источников излучения, характерной особенностью рабочего процесса которых является наличие быстрой (микросекундной)

высокотемпературной ($T_\lambda \sim 10000\text{--}40000$ К) стадии и медленной (миллисекундной) стадии – стадии формирования и существования плазменного тороидального вихря со сравнительно низкими эффективными температурами излучения (2000–5000 К) и большими временами (1–10 мс и более) высвета энергии [11].

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны эффективные средства комплексного измерения спектрально-энергетических и динамических характеристик импульсных источников широкополосного оптического излучения.

Принцип действия разработанных приборов основан на одновременной многоканальной регистрации излучения быстродействующими калиброванными фотоэлектрическими приемниками с соответствующими спектральными фильтрами; в качестве устройства регистрации, запоминания и преобразования аналоговых выходных сигналов приемных каналов используются цифровые осциллографы.

При измерениях регистрируются временные зависимости спектральной облученности и интегральная по спектру и по времени плотность энергии излучения на входных зрачках фотоприемников, по которым рассчитываются основные спектрально-энергетические характеристики излучателя – спектральные силы и угловые плотности энергии излучения, сила света, форма эмиссионного спектра, интегральная по спектру сила излучения, угловая плотность излучаемой энергии, а при известных размерах тела свечения – спек-

тральные яркости и эквивалентные температуры излучения.

Разработанные приборы могут применяться как в лабораторных, так и в полигонных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», мероприятие 1.2 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414X0067).

ЛИТЕРАТУРА

1. Маршак И. С. Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978.
2. Герасимов С. И., Файков Ю. И., Холин С. А. Кумулятивные источники света. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002.
3. Шидловский А. А. Основы пиротехники. – М.: Машиностроение, 1973.
4. Model USB 4000, Ocean Optics, Inc., <http://oceanoptics.com>
5. Solar S 100, SOLAR Laser Systems, ЗАО «СоларЛС», <http://solarlaser.com>
6. Hancock P., Cury R. D., McDonald K. F., Altgilbers L. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. Vol. 32. No. 5. P. 2026.
7. Schaefer R., Grapperhaus M., Schaefer I. // J. Environ. Eng. Sci. 2007. No. 6. P. 303. Doi: 10.1139/S06-068.
8. Bohrerova Z., Shemerb H., Lantisc R. // Water Research. 2008. Vol. 42. P. 2975.
9. Еремин В. Е., Клементов А. Д. Препринт ФИАН. № 172. – М., 1971.
10. Жарников М. Н., Камруков А. С., Кожевников И. В., Козлов Н. П., Росляков И. А. // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 5. С. 38.
11. Буланов С. С., Есиев Р. В., Камруков А. С., Козлов Н. П., Морозов М. И., Росляков И. А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 11. С. 87.

PACS: 52.70.Kz

Multispectral photoelectric converters for measuring the radiative characteristics of pulsed broadband optical radiation sources

V. P. Arkhipov, I. A. Zhelaev, A. B. Ivashkin, A. S. Kamrukov, and K. A. Semenov

Bauman Moscow State Technical University (National Research University)
5 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia
E-mail: kamrukov@mail.ru

Received March 3, 2017

Consideration is given to developed effective means of complex measurements of spectral-energy and dynamic characteristics of pulsed broadband sources of optical radiation. Information about the de-

sign, characteristics, calibration techniques and application of photoelectric transducers «Spectrum» is presented. The developed devices are designed for experimental studies and spectral measurements in laboratory and field conditions.

Keywords: photoelectric converter, pulsed radiation source, spectral characteristics, broadband radiation, measurement technique.

REFERENCES

1. I. S. Marshak, *Pulsed Light Sources* (Energiya, Moscow, 1978) [in Russian].
2. S. I. Gerasimov, Y. I. Faikov, and S. A. Hohlin, *Cumulative Light Sources*. (Sarov: VNIIEF, 2002) [in Russian].
3. A. A. Shildovskiy, *Basics of Pyrotechnics*. (Moscow, Mashinostroenie. 1973) [in Russian].
4. Model USB 4000, Ocean Optics, Inc., <http://oceanoptics.com>
5. Solar S 100, SOLAR Laser Systems, <http://solarlaser.com>
6. P. Hancock, R. D. Curry, K. F. McDonald, and L. Altgilbers, *IEEE Transactions on Plasma Science*. **32** (5), 2026 (2004).
7. R. Schaefer, M. Grapperhaus, and I. Schaefer, *J. Environ. Eng. Sci.* No. 6, 303 (2007) Doi: 10.1139/S06-068.
8. Z. Bohrerovaa, H. Shemerb, and R. Lantisc, *Water Research*. **42**, 2975 (2008).
9. V. E. Eremin and A. D. Klementov, Preprint FIAN, No. 172 (Moscow, 1971) [in Russian].
10. M. N. Garnikov, A. S. Kamrukov, I. V. Kogevnikov, N. P. Kozlov, and I. A. Roslyakov, *Technical Physics* **53** (5), 571 (2008).
11. S. S. Bulanov, R. U. Esiev, A. S. Kamrukov, N. P. Kozlov, M. I. Morozov, and I. A. Roslyakov, *Technical Physics* **55** (11), 1633 (2010).