

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ ПИРОПРИЕМНИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА В ВАКУУМНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

© 2012 г. А. Г. Бедрин\*, канд. физ.-мат. наук; Г. Г. Ворыпаев\*\*, канд. физ.-мат. наук;  
Е. М. Голубев\*\*; А. Н. Жилин\*

\* Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

\*\* НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: vorypaev@bk.ru

Разработан малогабаритный помехоустойчивый пироэлектрический калориметр со спектральной селекцией излучения, осуществляемой фильтрами из кварца и инертных газов. Калориметр предназначен как для измерения спектрально-энергетических характеристик мощных импульсных плазменных излучателей, так и для измерения облученности поверхности испытываемых предметов в телесном угле 2л стерадиан. Проведена энергетическая калибровка калориметра. Полученные результаты подтверждены термопарными измерениями.

*Ключевые слова:* вакуумный ультрафиолет, пироэлектрик, пироприемник, калориметр.

Коды OCIS: 220.6080, 260.7210, 350.5400

Поступила в редакцию 04.04.2012

### Введение

Излучение плотной плазмы является основным каналом преобразования вводимой в разряд джоулевой энергии. Мощные импульсные плазменные излучатели используются в научно-технических задачах для определения световой стойкости материалов и изделий. Как известно, основная доля энергии теплового излучения плазмы с температурой более 20 кК приходится на вакуумную ультрафиолетовую (ВУФ) область спектра, в том числе и за границей пропускания окон из  $MgF_2$  (115 нм). Спектрально-энергетические характеристики ВУФ излучения позволяют судить об основных параметрах плазмы (температуре, давлении, компонентном составе и т. д.), а также являются технологическими параметрами в прикладных задачах (плазменная обработка поверхностей, резка, нанесение покрытий, фототравление, фотолитография, обеззараживание и обезвреживание опасных веществ).

Измерение основных параметров ВУФ излучения мощного плазменного открытого источника, как правило, связано с необходимостью

преодоления мешающего влияния паразитных связей и наводок на электронное оборудование, причем требуются особые меры безопасности от сильноточных электрических пробоев. Следует упомянуть об удачном опыте измерения энергии излучения открытого импульсного разряда в ВУФ области спектра, выполненного в ГОИ А.М. Пуховым [1]. При этом инертный газ атмосферного давления играл роль прозрачного изолятора, предохраняющего измерительные цепи от воздействия высокого потенциала плазмы (напряжение электрического пробоя в аргоне – 6 кВ/см).

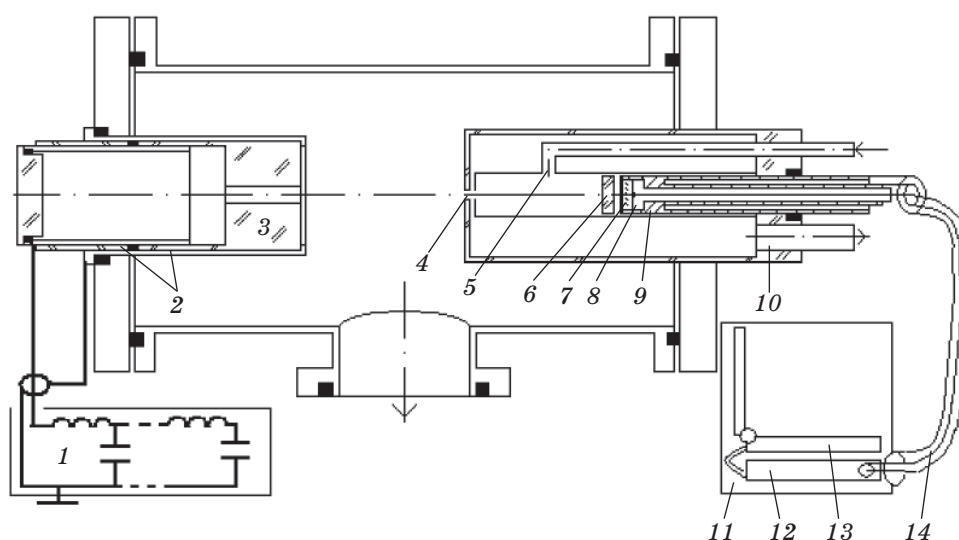
Другой подход реализован при исследовании ВУФ излучения сильноточного разряда низкого давления в водороде в конфигурации магнитных полей, токов и разрядного промежутка, соответствующих задачам термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы [2, 3]. В этих работах указано, что промышленно выпускаемые пироэлектрические приемники не подходят для измерения ВУФ излучения, если они размещаются непосредственно в вакуумированном объеме. Опытным путем была установлена необходимость тщательной изоля-

ции сигнального электрода и соединения приемной площадки пироприемника с внутренним экраном измерительной цепи. Высокий вакуум и магнитное удержание плазмы в центре объема снижают вероятность газового пробоя у стенки, изолируя плазму от стенки камеры и пироэлектрика и тем самым упрощая измерения. В результате оказалось возможным, не используя электрических развязок, подключать регистрирующую аппаратуру через операционный усилитель к коллимированному пироприемнику, освещаемому через небольшое отверстие плазмой разряда. При неколлимированном освещении такая схема измерений становилась неработоспособной из-за больших наводок. Выход был найден в использовании токового трансформатора, через который проделался один из выходных проводов операционного усилителя. Этим обеспечивалась электрическая развязка регистрирующей аппаратуры от корпуса пироприемника, находящегося под плавающим потенциалом. В то же время имеются общие положения, выработанные для повышения помехозащищенности измерений в подобных условиях [4]. В соответствии с ними схема измерительного канала должна включать в себя экранированный от сопутствующих импульсных электрических и магнитных полей измерительный пироэлектрический преобразователь, помехозащищенную (экранирован-

ную) линию связи и экранированный приборный отсек с автономным источником питания (аккумуляторной батареей). Реализация этих мер позволила авторам статьи провести пироэлектрические измерения энергии излучения капиллярного разряда в областях пропускания кристаллических и газовых фильтров [5], а само измерительное устройство было защищено патентом [6].

## Эксперимент и обсуждение результатов

Излучателем служил капиллярный разряд с испаряемой стенкой (КРИС), который в короткоимпульсном варианте является калибровочным источником ВУФ излучения [7]. Он располагался (рис. 1) в вакуумной камере, снабженной электродами 2, которые отделены один от другого диафрагмой. Укрепленный в ее центре капилляр 3 из полиформальдегида ( $\text{CH}_2\text{O}$ )<sub>n</sub> с отверстием диаметром 3,5 мм и длиной 30 мм является рабочим разрядным промежутком. Электроды камеры подключаются к LC линии 1, которая создает в капилляре одиночный трапециевидный импульс тока силой 10 кА и длительностью 6 мкс. При этом в капилляре образуется плотная плазма при давлении в сотни атмосфер, химический состав которой соответствует составу стенки. Вводи-



**Рис. 1.** Схема калибровки пироприемника: 1 – блок питания источника излучения, 2 – электроды, 3 – капилляр, 4 – коллимирующая диафрагма, 5 – патрубок напуска инертного газа, 6 – кварцевый фильтр, 7 – пироэлемент, 8 – изоляция, 9 – корпус пироприемника, 10 – патрубок дифференциальной откачки, 11 – экранированный бокс, 12 – компьютерный осциллограф PCSU-1000, 13 – ноутбук в режиме автономного питания, 14 – защищенная линия связи.

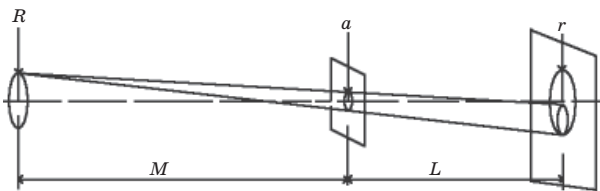
мая в разряд мощность отводится плазменными струями, истекающими из открытых торцов со скоростью 10 км/с. Показано, что если осевое расстояние от торца до элементов конструкции более 15 см, то за счет резкого падения плотности свободно расширяющаяся струя не экранирует ВУФ излучения плазмы капилляра. Его торец в окрестности максимума тока излучает как абсолютно черное тело (АЧТ) с температурой  $(37\ 000 \pm 2000)$  К в области спектра от 120 до 600 нм и с ресурсом 200 импульсов без замены капилляра. Яркость равномерно светящейся зоны торца капилляра диаметром 3 мм в спектральной области пропускания кварца составляет  $0,76 \times 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> ср [7].

Необходимый для энергетической калибровки приемника коллимированный пучок света формируется при прохождении его от калибровочного источника к приемнику излучения через малое отверстие в диафрагме (рис. 2). Из соображений геометрической оптики необходимым условием равномерности освещения приемника является соотношение

$$L/(r - a) \leq M/(R + a), \quad (1)$$

где  $L$  и  $M$  – расстояния от диафрагмы до источника и приемника;  $a$ ,  $r$  и  $R$  соответственно радиусы диафрагмирующего отверстия, равномерно светящейся зоны калибровочного источника света и освещенной поверхности приемника излучения.

Для измерения параметров излучения используются фотоприемники на различных физических принципах [8]. Для импульсных излучателей пироэлектрические приемники являются наиболее удобными из-за их неселективности, высокого временного разрешения и большого динамического диапазона.



**Рис. 2.** Схема освещения пироприемника:  $R$  – пироприемник и его радиус,  $a$  – диафрагма и ее радиус,  $r$  – торец капилляра калибровочного источника света и радиус его равномерно светящейся зоны,  $L$  и  $M$  – соответственно расстояния от диафрагмы до капилляра и до приемника.

По сути, пироприемник является электрическим конденсатором [9] с исходно поляризованным диэлектриком между металлизированными поверхностями – обкладками. Принцип его действия основан на свойстве диэлектрика поляризоваться не только под действием напряженности электрического поля  $E$ , но и при изменении температуры  $\Delta T$ . Индукция поля в нем равна  $D = \varepsilon E + p\Delta T$ , где  $\varepsilon$  и  $p$  – диэлектрическая проницаемость и пироэлектрический коэффициент соответственно. Если в измерительной цепи отсутствуют источники потенциала, создающие внешние заряды на обкладках пироконденсатора, индукция поля отсутствует и тогда  $-\varepsilon E/p = \Delta T$ .

Энергия излучения ( $Q$ ), поглощенная пироэлектриком, идет на его нагрев и пропорциональна напряжению ( $U$ ) между его обкладками

$$Q = \int q dt = \int \rho c_v \Delta T dx = kU, \quad (2)$$

где  $\rho$  и  $c_v$  – плотность и удельная теплоемкость пироэлектрика ( $k = p/\rho c_v \varepsilon$  – коэффициент чувствительности).

Наличие спонтанно поляризованного состояния для пироэлектрика, находящегося при постоянной температуре, внешне никак не проявляется, так как связанные заряды поляризации нейтрализуются свободными зарядами проводимости диэлектрика и внешней среды. Поэтому пироприемник реагирует только на достаточно быстрое изменение собственной температуры. Для такого широко распространенного пироэлектрика, как керамика на основе твердого раствора цирконата-титаната свинца ЦТС-23, значение коэффициента чувствительности  $k = 0,0135$  Дж/В см<sup>2</sup> [9].

Большая величина диэлектрической проницаемости ( $\approx 1400$ ) керамики позволяет создать малоразмерный емкостной приемник, электрический сигнал которого не нуждается в предварительной обработке и регистрируется непосредственно стандартным осциллографом. Материалом для пироприемника служит диск из пьезокерамики толщиной 0,3 мм и диаметром около 20 мм с медным покрытием на торцах. Из керамики вырезалась шайба диаметром 2,5 мм, которая в качестве пироэлемента 7 (рис. 1) припаивалась к центральной жиле коаксиального кабеля. Герметизация эпоксидной изоляцией 8 сигнальной части пироэлектрика и наличие внутреннего и внешнего экранов, соединенных вблизи пироэлектрика, – необходимое условие возможности использования датчика при измерении интенсивности ВУФ

открытых разрядов [5]. Подключение проводящего покрытия поверхности приемника к корпусу трубки 9 осуществлялось путем завальцовки выступающего края трубки к приемной поверхности до электрического контакта. Для исключения возможности попадания фотоэлектронов с поверхности в глубь пироэлектрика 5 производилось гальваническое наращивание толщины торцевого покрытия.

Пироприемник калибровали на установке (рис. 1) излучением источника СП-171, прошедшим через кварцевый фильтр 8 при удовлетворяющих соотношению (1) расстояниях  $M = 85$  мм до диафрагмы, диаметром 1 мм и  $L = 50$  мм до торца капилляра. Расстояние  $L$  значительно меньше рекомендованных разработчикам 15 см [7]. Это обстоятельство приводит к уменьшению яркости источника в ВУФ области короче 140 нм за счет экранировки излучения в сжатом слое перед диафрагмой, но не влияет на яркость источника в области прозрачности кварца. Так же как и в [7] роль коллимирующей диафрагмы 4 выполняют два соосных газовых сопла, диаметром 1 мм каждое. Они служат для создания стационарно поддерживаемого перепада давления инертного газа между камерой поглощения с пироприемником 9 ( $\approx 500$  Па) и отдельно откачиваемой камерой источника излучения ( $\approx 10$  Па). Подача газа происходит по патрубку 5, а его откачка из зоны между отверстиями – по патрубку 10.

Исходя из геометрии освещения, рассчитана облученность поверхности приемника  $q = I\pi a^2/M^2 = 82$  Вт/см<sup>2</sup>, значение которой необходимо для определения коэффициента чувствительности приемника.

На рис. 3 представлены осциллограммы тока разряда (1) и сигнала пироприемника (2) при регистрации энергии излучения источника СП-171 в спектральной области пропускания кварцевого фильтра, а на рис. 4 – осциллограммы излучения, зарегистрированные с использованием газовых фильтров. В соответствии со свойствами капиллярного разряда у всех осциллограмм совпадает время нарастания сигнала и длительность импульса тока ( $\approx 10$  мкс) и монотонно возрастает сигнал с увеличением потенциала ионизации инертного газа (Xe, Kr, Ar, Ne), используемого в качестве фильтра. Тангенс угла наклона осциллограммы (скорость нарастания сигнала) пропорционален облученности поверхности приемника в соответствии с формулой (2) и, следовательно, яр-

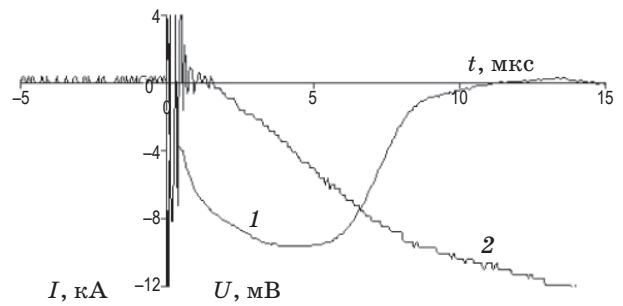


Рис. 3. Осциллограммы тока разряда источника СП-171 (1) и его энергии излучения в спектральной области пропускания кварца (2).

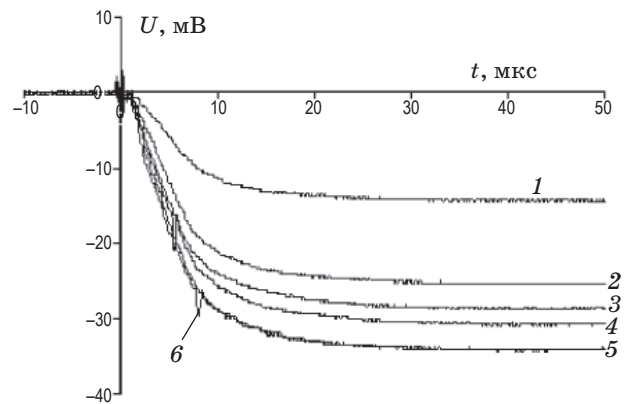


Рис. 4. Пироэлектрические осциллограммы энергии излучения источника СП-171 в области спектра пропускания фильтров: 1 – SiO<sub>2</sub>, 2 – Xe, 3 – Kr, 4 – Ar, 5 – Ne, 6 – He.

**Таблица 1.** Относительные скорости нарастания пироэлектрического сигнала излучения источника СП-171, прошедшего через фильтры SiO<sub>2</sub>, Xe, Kr, Ar, Ne, He ( $dU/dt$ ) и рассчитанные доли интенсивности излучения АЧТ при  $T = 37\,000$  К в тех же спектральных областях ( $\beta$ ). За единицу приняты соответствующие значения в спектральной области пропускания кварца

Фильтр	SiO <sub>2</sub>	Xe	Kr	Ar	Ne	He	Вакуум
$\lambda$ (нм)	$\geq 170$	$\geq 102$	$\geq 89$	$\geq 78$	$\geq 57$	$\geq 50$	—
$dU/dt$	1	1,70	1,77	1,85	2,06	2,01	—
$\beta$	1	2,37	2,82	3,14	3,84	4,00	4,20

кости источника. В табл. 1 приведены относительные скорости нарастания пиросигнала от излучения источника света СП-171, прошедшего через фильтры SiO<sub>2</sub>, Xe, Kr, Ar, Ne, He и вакуум и для сравнения доли относительной

**Таблица 2.** Измеренные значения яркостной температуры излучения источника СП-171 в соответствующих спектральных областях

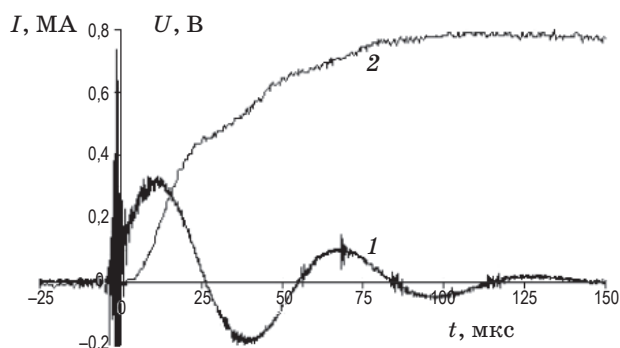
SiO <sub>2</sub> , λ ≥ 170 нм	SiO <sub>2</sub> -Xe, 170–102 нм	Xe-Kr, 102–89 нм	Kr-Ar, 89–78 нм	Ar-Ne, 78–57 нм
37 000 К [10]	30 500 К	25 700 К	32 500 К	30 500 К

интенсивности излучения АЧТ при  $T = 37$  кК в тех же спектральных областях. За единицу принята яркость источника света СП-171 в области пропускания кварцевого фильтра. Из сравнения данных, приведенных в таблице, следует, что интенсивность излучения источника СП-171 в более коротковолновой области спектра меньше интенсивности излучения АЧТ при  $T = 37$  кК. В табл. 2 представлены рассчитанные по данным табл. 1 значения яркостной температуры излучения источника СП-171 в областях пропускания кварцевого и газовых фильтров. По нашему мнению, снижение яркостной температуры связано с поглощением излучения в скачке уплотнения плазменной струи перед диафрагмой.

По осциллограмме излучения источника СП-171 в области пропускания кварцевого фильтра (рис. 3) был определен коэффициент пирочувствительности  $k = 0,046$  Дж/В см<sup>2</sup>. Он вычислялся как частное от деления расчетного значения облученности (82 Вт/см<sup>2</sup>) на среднюю скорость изменения напряжения сигнала (1780 В/с). Знание коэффициента необходимо для абсолютных измерений освещенности поверхности. Для независимой проверки этого результата было проведено сравнение сигналов, полученных с использованием пироэлектрического и термопарного калориметров в одинаковых условиях. Использовался предварительно откалиброванный термопарный калориметр ИМО-2. Проверка подтвердила достоверность результатов в пределах точности измерений.

На базе НИИКИ ОЭП созданный пирокалориметр был опробован на мощной стендовой установке для измерения облученности поверхности источником света на основе сильноточного магнитоплазменного компрессора (МПК). На рис. 5 представлены осциллограммы разрядного тока МПК и пироэлектрических измерений его энергии излучения в спектральной области пропускания кварцевого стекла. Очевидна корреляция обеих осциллограмм. Контрольные термопарные изме-

\* \* \* \* \*



**Рис. 5.** Осциллограммы: 1 – тока источника излучения на основе МПК, 2 – облученности пироприемника, размещенного вне вакуумной камеры излучателя.

рения энергии излучения также подтвердили правильность калибровки пироэлектрического калориметра и его высокую помехозащищенность.

### Заключение

В результате проделанной работы создан малогабаритный помехоустойчивый пироэлектрический калориметр со спектральной селекцией излучения, осуществляемой фильтрами из кварца и инертных газов. Проведена его энергетическая калибровка. В качестве эталонного ВУФ излучателя использовался короткоимпульсный вариант капиллярного разряда с испаряемой стенкой. Полученные результаты подтверждены термопарными измерениями с использованием предварительно откалиброванного калориметра ИМО-2. Разработанное устройство предназначено как для измерения спектрально-энергетических характеристик мощных импульсных плазменных излучателей, так и для измерения облученности поверхности испытываемых предметов в телесном угле  $2\pi$  стерадиан.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баюнов В.И., Пухов А.М. Применение пироэлектрического приемника для определения энергии излучения импульсного открытого разряда в ВУФ области спектра // ЖПС. 1990. Т. 52. № 1. С. 151–153.
  2. Côté C., Desilva A.W. Fast pyroelectric detector for broadband radiated power measurements. Rev. Sci. Instrum // 1996. V. 67. P. 4146–4149.
  3. Côté C. Power Balance and Characterization of Impurities in the Maryland Spheromak // Dissertation. University of Maryland. 1993. 132 p.
  4. Панин В.В., Степанов Б.М. Измерение импульсных магнитных и электрических полей. М.: Энергоатомиздат, 1987. 120 с.
  5. Бедрин А.Г., Ворыпаев Г.Г., Голубев Е.М. Помехозащищенный пироэлектрический калориметр для спектро-энергетических измерений в вакуумном ультрафиолете // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 9. С. 64–67.
  6. Бедрин А.Г., Ворыпаев Г.Г., Голубев Е.М., Жилин А.Н., Левина О.В. Устройство для измерения амплитудно-временных характеристик импульсных сигналов // Патент России. № 95852. 2010.
  7. Подмошенский И.В., Пухов А.М., Яковлева А.В. Импульсный источник сплошного спектра, калиброванный по яркости в вакуумном ультрафиолете // ЖПС. 1972. Т. 16. № 3. С. 415–421.
  8. Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1986. 175 с.
  9. Новик В.К., Гаврилова Н.Д., Фельдман Н.Б. Пироэлектрические преобразователи. М.: Сов. радио, 1979. 176 с.
-