

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫЙ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КАЛОРИМЕТР ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ВАКУУМНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

© 2009 г. А. Г. Бедрин*, канд. физ.-мат. наук; Г. Г. Ворыпаев**, канд. физ.-мат. наук;
Е. М. Голубев**; А. Н. Жилин*; О. В. Левина**

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

** Санкт-Петербургский Государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: levinao@mail.ru

Пироэлектрический калориметр со спектральной селекцией излучения, осуществляемой посредством набора кристаллических и газовых фильтров, предназначен для измерения спектрально-энергетических характеристик мощных импульсных плазменных излучателей в вакуумной ультрафиолетовой области спектра. Разработана система мер по его защите от воздействия высокоскоростных плазменных струй и импульсных электромагнитных полей. Проведена энергетическая калибровка калориметра.

Ключевые слова: пироэлектрический калориметр, капиллярный разряд, вакуумный ультрафиолет, световая стойкость.

Коды OCIS: 220.6080, 260.7210, 350.5400

Поступила в редакцию 13.05.2008

Мощные плазменные излучатели с яркостной температурой более 20 000 К используются в технике для определения световой стойкости материалов и изделий. Как известно, основная доля энергии теплового излучения при таких температурах приходится на вакуумную ультрафиолетовую (ВУФ) область спектра (50–200 нм). Целью настоящей работы является создание калориметра и разработка методов измерения ВУФ излучения мощных открытых вакуумных разрядов. Селекция излучения по спектру обеспечивается набором газовых и кристаллических фильтров [1, 2], размещаемых перед неселективным пироприемником, что позволяет измерять спектрально-энергетические потоки излучения с разрешением десятки нанометров. В ближней ВУФ области спектра такими фильтрами служат инертные газы, прозрачные до границы фотоиниции с основного состояния, а также окошки из плавленого кварца и фтористого магния.

Для формирования световых пучков с заданной апертурой, а также разделения газонаполненных и вакуумируемых объемов и вывода излучения используется система апертурных диафрагм с дифференциальной откачкой. Использование пироэлектрического приемника

позволяет непосредственно регистрировать энергию излучения разряда в ВУФ области спектра. Спектрально-энергетическая калибровка фотоприемника осуществляется разработанным ранее в ГОИ им. С.И. Вавилова эталонным излучателем на основе капиллярного разряда. Особое внимание уделяется защите фотоприемника от теплового и механического воздействий плазменного потока и электромагнитных наводок, создаваемых сильноточными разрядными цепями. Настоящая работа является продолжением исследований, результаты которых представлены в статьях [1, 2].

Разработанный авторами калориметр 4 (рис. 1) состоит из двух последовательно расположенных вакуумных камер 5 и 6, смонтированных на общем фланце, в центре которого помещен пироэлектрический приемник излучения 8. Внутри камеры 6 расположен поворотный столик 7 с укрепленными на нем окошками из фтористого магния и плавленого кварца. Ближайшая к фотоприемнику вакуумная камера 6 предназначена для заполнения поглощающим газом (ее длина – 180 мм) и сообщается с внешней камерой через отверстие диаметром 1 мм. Внешняя (шлюзовая) камера 5 служит для понижения давления по-

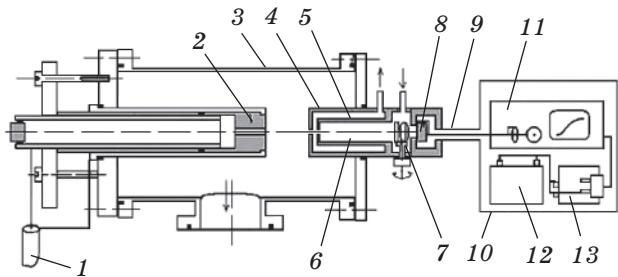


Рис. 1. Схема калибровки калориметра. 1 – сильноточный кабель эталонного источника света, 2 – капилляр, 3 – вакуумная камера, 4 – калориметр, 5 – шлюзовая камера, 6 – камера поглощения, 7 – блок сменных кристаллических фильтров, 8 – пироприемник, 9 – экранированная линия связи, 10 – экранированный приборный отсек, 11 – осциллограф, 12 – аккумулятор, 13 – преобразователь напряжения.

глощающего газа до 10 Па. Со стороны источника излучения она оснащена обтекаемой насадкой, оканчивающейся диафрагменным отверстием диаметром 1 мм. Расстояние между первой и второй диафрагмами, которые служат одновременно и апертурным отверстием оптической системы, составляет 4 мм. Диаметры их отверстий определяются исходя из необходимости поддержания давления газа в камере поглощения и в камере источника излучения на уровне 100 Па и 1 Па соответственно, а также возможностями имеющейся вакуумной техники. Расчет вакуумной системы производился в соответствии с работой [3] и показал, что для обеспечения работоспособности установки достаточно откачивать шлюзовую камеру и камеру источника излучения насосами с быстрой действия 2 и 5 л/с соответственно.

Инертный газ поступает в калориметр через натекатель, давление в камере поглощения контролируется U-образным масляным манометром. Фотоионизационное поглощение инертных газов обеспечивает их полную непрозрачность за границей фотоионизации при давлении в камере поглощения порядка 100 Па [1]. Необходимые для расчетов значения сечений фотопоглощения ксенона, криптона, аргона и гелия взяты из работы [4]. Полагается, что спектральное пропускание используемых газовых фильтров (He, Ar, Xe) имеет ступенчатый характер с границами, определяемыми их потенциалами ионизации, соответственно 50,4, 78,7 и 102,2 нм.

При помощи грибкового уплотнения калориметр можно состыковывать как с камерой эталонного источника света 3 (для проведения

энергетической калибровки пироприемника), так и с вакуумной камерой широкоформатного излучателя (для проведения его спектрально-энергетических исследований) и перемещать в осевом направлении в пределах 50 мм, приближая или удаляя от источника излучения. Расстояние от источника излучения до апертурной диафрагмы калориметра (x) определяется диаметром равномерно светящейся области капилляра (2 r). Геометрическое построение показывает, что эти величины связаны условием

$$A/(R + a) = x/(r - a),$$

где $2R = 13$ мм и $2a = 1$ мм – диаметры, соответственно, рабочей поверхности фотоприемника и апертурной диафрагмы, $A = 180$ мм – длина камеры поглощения. Такая геометрия обеспечивает угловое поле зрения системы – 4°. Исходя из этого выбираются необходимые расстояния от калориметра до эталонного и до широкоформатного источников света.

В качестве эталонного излучателя для энергетической калибровки калориметра использовался модифицированный вариант плазменного стандарта яркости “Импульс-5” [5] с коаксиальной разрядной камерой. Источником излучения в нем является плазма капиллярного разряда с испаряемой стенкой (КРИС), создаваемая путем пропускания через капилляр 2 диаметром 3,5 мм и длиной 30 мм импульса тока трапецидальной формы с амплитудой 9,0 кА и длительностью 30 мкс. При этом торец капилляра излучает в области спектра 160–800 нм как абсолютно черное тело с температурой 37 000 К [5]. Учитывая, что для данного источника $2r = 3$ мм, расстояние от него до капилляра не должно превышать 26 мм.

На основании свойства спектральной неселективности пироэлектрических приемников [6, 7] была проведена энергетическая калибровка калориметра в области пропускания кварцевого окна.

Как известно, пропускание окошеч вблизи границы прозрачности сильно зависит от их толщины и технологии изготовления, поэтому предварительно были измерены их спектральные коэффициенты пропускания. Сканирование по спектру осуществлялось с помощью вакуумного монохроматора ВМ-4, просвечивающим источником служила водородная лампа, а приемником излучения – фотоумножитель с окошком, покрытым слоем салицилата натрия (1 мг/см²), имеющего в области спектра 40–340 нм постоянный квантовый выход люминесценции.

Спектральная зависимость коэффициента пропускания кварцевого окошка имеет резкую коротковолновую границу 157 нм. Интенсивность излучения капилляра в полосе пропускания кварцевого окошка толщиной 1,5 мм определялась численным интегрированием по спектру и составила $0,76 \times 10^6$ Вт/см²ср. Аналогичным образом было измерено спектральное пропускание окошка из фтористого магния толщиной 2 мм вблизи его границы пропускания (115 нм). Расчетное значение интенсивности излучения капилляра в полосе пропускания окошка составило $0,96 \times 10^6$ Вт/см²ср.

Для защиты от электромагнитных наводок, генерируемых мощными плазменными источниками света, регистрирующая аппаратура размещена в малогабаритном (35×25×50 см) изолированном экранированном боксе 10, выполненном из стали толщиной 3,5 мм. Автономное электропитание осциллографа TDS 1002 11 обеспечивает аккумуляторная батарея 12 и инвертер 13, преобразующий постоянное напряжение 12 В в переменное 220 В. Сигнал от пироприемника поступает на вход осциллографа по коаксиальному кабелю с двойным экраном. На практике, как правило, в полной мере предусмотреть пути наводок не представляется возможным, поэтому борьба с ними носит экспериментальный характер. Опыт работы авторов с пироэлектрическим калориметром показал, что для устранения электрических наводок достаточны следующие меры:

- приемная площадка пироэлектрика электрически и вакуумно-плотно соединяется с металлическим корпусом калориметра и симметрично подключается к оплетке коаксиального кабеля (рис. 1),
- внешняя поверхность пироэлектрика подключается к центральной жиле коаксиального кабеля, а кабель – ко входу осциллографа TDS 1002,
- корпуса пироэлектрика и приборного отсека соединяются внешним экраном коаксиального кабеля.

Подобная схема позволяет полностью избавиться также и от электрических наводок, “гуляющих” по сети и “земляным” цепям, и максимально приблизить регистрирующую аппаратуру к калориметру.

Осциллограммы пироэлектрических измерений энергии излучения капиллярного разряда в областях пропускания кристаллических и газовых фильтров приведены на рис. 2. Все они имеют времена линейного нарастания сигнала, близкие к длительности импульса тока (30 мкс).

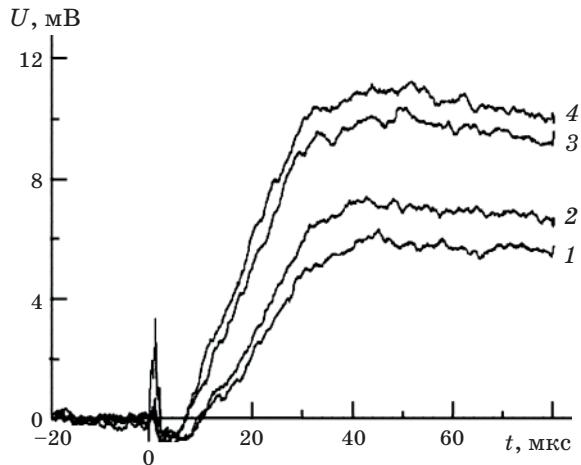


Рис. 2. Осциллограммы энергии излучения капиллярного разряда в областях пропускания фильтров. 1 – SiO_2 , 2 – MgF_2 , 3 – Xe , 4 – Ar , He , вакуум.

Длительность регистрации ограничена приходом акустического возмущения на 75-ой микросекунде (заброс осциллограмм). Заметим, что наличие или отсутствие He или Ar -фильтра не меняет амплитуды сигнала, что обусловлено спектрально-энергетическими характеристиками используемого эталонного излучателя. Согласно [5] при $\lambda < 140$ нм интенсивность сплошного излучения капиллярного разряда падает вследствие его экранировки в факеле разряда. Поглощение происходит в резонансных линиях и фотоионизационных континуумах атомов элементов, входящих в состав материала стенки капилляра (углерод, кислород, водород)*. В остальных случаях (Xe , MgF_2 и SiO_2) использование фильтров с более коротковолновой границей пропускания приводит к возрастанию сигнала. Пользуясь соотношением сигналов, приведенных на рис. 2, была оценена яркостная температура плазмы в областях спектра 160–115, 115–102 и 102–78,7 нм как 36, 33 и 24 кК соответственно.

Энергетическая чувствительность (α) используемого пироэлектрического приемника была оценена на основании известных интенсивности излучения капиллярного разряда в полосе пропускания кварцевого окна ($I = 0,76 \times 10^6$ Вт/см²ср), площади отверстия апертурной диафрагмы ($S = 0,008$ см²), телеви-

* Устраниить экранировку излучения удается радикальным сокращением длительности импульса свечения. Для капиллярного разряда длительностью 3 мкс интенсивное сплошное излучение простирается до 50 нм и ограничено лишь эффективностью дифракционной решетки [8].

сного угла, в котором эталонный источник освещает приемную площадку пироэлектрика ($\Omega = 0,4 \times 10^{-2}$ ср), и тангенса угла наклона осциллограммы на участке линейного нарастания сигнала ($\Delta U/\Delta t = 240$ В/с), и составила $\alpha = IS\Omega\Delta t/\Delta U \approx 0,11$ Дж/В.

Таким образом, в результате проделанной работы создан пироэлектрический калориметр со спектральной селекцией излучения кристаллическими и газовыми фильтрами, предназначенный для измерения излучательных характеристик мощных плазменных разрядов, проведена его энергетическая калибровка и отработана методика спектрально-энергетических измерений, а также разработан и изготовлен помехозащищенный измерительный канал с автономным питанием для осциллографирования низковольтных пироэлектрических сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бедрин А.Г., Ворыпаев Г.Г., Голубев Е.М., Жилин А.Н., Эльц В.К. Установка для спектрально-энергетических исследований плазменных источников света в вакуумной ультрафиолетовой области спектра // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 2. С. 56–59.
2. Бедрин А.Г., Ворыпаев Г.Г., Голубев Е.М., Жилин А.Н., Левина О.В., Эльц В.К. Диагностический зонд для измерения спектрально-энергетических характеристик мощных плазменных излучателей в ВУФ области спектра // Тез. докл. VII Межд. симп. по радиационной плазмодинамике. М., 2006. С. 261–264.
3. Королев Б.И., Кузнецов В.И., Пипко А.И., Плисковский В.Я. Основы вакуумной техники. М.: Энергия, 1975. 416 с.
4. Samson J.A.R. Techniques of vacuum ultraviolet spectroscopy. N.Y., London, Sydney: John Wiley & Sons, Inc., 1967. 348 p.
5. Любарская Т.С., Пухов А.М. Коротковолновое излучение импульсного плазменного источника света ИСИ-1 // ЖПС. 1986. Т. 45. № 6. С. 899–903.
6. Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. М.: МГУ, 1986. 384 с.
7. Новик В.К., Гаврилова Н.Д., Фельдман Н.Б. Пироэлектрические преобразователи. М.: Сов. Радио, 1979. 176 с.
8. 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.