

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 фотоионизации с основного состояния, а также окошки из плавленного 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 плавленного 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-

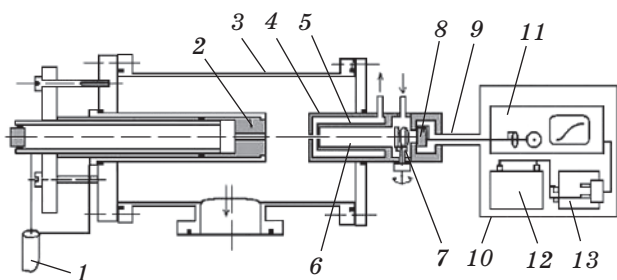


Рис. 1. Схема калибровки калориметра. 1 – высоковольтный кабель эталонного источника света, 2 – капилляр, 3 – вакуумная камера, 4 – калориметр, 5 – шлюзовая камера, 6 – камера поглощения, 7 – блок сменных кристаллических фильтров, 8 – пироприемник, 9 – экранированная линия связи, 10 – экранированный 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 быстротой 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 ($2r$). 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 трапецеидальной 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 окошек 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/см^2), 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 обеспечивают 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).

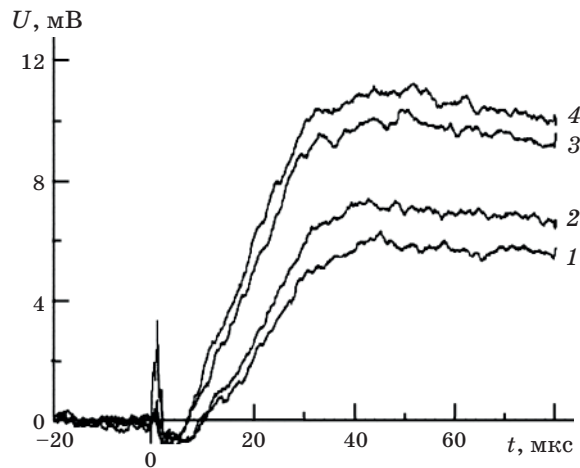


Рис. 2. Осциллограммы энергии излучения капиллярного разряда в областях пропускания фильтров. 1 – SiO₂, 2 – MgF₂, 3 – Xe, 4 – Ar, He, вакуум.

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, MgF₂ и SiO₂) 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/см² ср), площади отверстия апертурной диафрагмы ($S = 0,008$ см²), теле-
* Устранить экранировку излучения удастся 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.