

УДК 533.9.082.5

Экспериментальный метод пассивной оптической диагностики плазмы

Ю. А. Железнов, В. Ю. Хомич

Предложен экспериментальный метод пассивной оптической диагностики плазмы. Дано описание комплекса аппаратуры, разработанного для его практической реализации. Метод основан на одновременной регистрации спектров собственного излучения и изображений плазмы с последующим анализом зарегистрированных данных. Данный метод может применяться для диагностики плазмы, генерируемой самыми разнообразными способами: электрическим разрядом в газе, лазерным излучением, ударной волной, взрывом и другими.

PACS: 52.70.Kz

Ключевые слова: оптическая диагностика плазмы, спектр излучения плазмы, изображение плазмы, плазматрон.

Введение

Плазма является достаточно сложным объектом для экспериментального исследования, так как она представляет собой в общем случае не только многокомпонентную, но также и неоднородную и неравновесную структуру. Плазма характеризуется десятками самых разнообразных параметров, которые могут принимать очень широкий спектр значений.

К настоящему времени было разработано множество различных методов и создана соответствующая аппаратура для исследования целого ряда физических и химических свойств плазмы [1—11]. Экспериментальные методы исследования плазмы принято подразделять на четыре основные группы: пассивные, активные, силовые и методы контроля и управления плазменными технологическими процессами. Подавляющее большинство методов относятся к активным и пассивным [1].

При активных методах исследования используют зонды и датчики, вводимые в плазму, лазерные и корпускулярные излучения, т. е. в этих методах изначально предполагается взаимодействие с исследуемой структурой, а следовательно, и изменение первоначального состояния плазмы [1]. Среди активных методов диагностики плазмы наиболее распространенными являются зондовые

методы, при которых в плазму вводятся специальные устройства, регистрирующие один или несколько параметров плазмы [8—10]. Использование зондовых методов позволяет определить характеристики электронной и ионной компонент плазмы, ее потенциал, величину и конфигурацию полей внутри плазмы, температуру и другие основные параметры. Так, например, с помощью зондового метода, использующего лэнгмюровский датчик, можно измерить потенциал плазмы, плавающий потенциал, температуру электронов, ионную и электронную плотность, а также функции распределения энергии электронов [8]. Одним из основных преимуществ зондовых методов является локальность измерений, а существенным недостатком, который в целом ряде исследований является принципиальным, — возмущение плазмы зондом. Эти методы применимы в экспериментах, если обусловленное зондом возмущение достаточно слабо или может быть адекватно учтено и выделен сигнал, отвечающий невозмущенной плазме.

При пассивных методах диагностики для определения параметров плазмы используются те процессы и явления, которые протекают в самом плазменном образовании и могут быть зарегистрированы на его периферии: электромагнитные излучения в широком диапазоне длин волн (рентгеновский, ультрафиолетовый, видимый, инфракрасный, микроволновый), корпускулярные излучения, электрические и магнитные поля, существующие вокруг плазменной структуры [1, 2, 11, 12].

Необходимо отметить, что термин “пассивные методы” является несколько условным, так как при использовании таких методов исследования плазмы может иметь место некоторое воздействие

Железнов Юрий Анатольевич, заведующий лабораторией.
Хомич Владислав Юрьевич, заместитель директора.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18.
Тел. (495) 938-18-66. E-mail: machine@mail15.com

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2011 г.

на плазму. Так, например, диагностические окна, устанавливаемые для вывода подлежащего регистрации электромагнитного излучения, могут формировать различные паразитные электрические связи или микроволновые резонаторы. Каналы вывода излучений или ввода регистрирующих приемников могут нарушать симметрию разряда или вводить примеси в плазму за счет распыления материала. Однако такие воздействия оказывают существенно меньшее влияние на плазму по сравнению с активными методами. Кроме того, их влияние можно минимизировать или даже свести практически к нулю.

Среди применяемых в исследованиях плазмы методов одними из наиболее информативных являются оптические, так как, используя их, можно проводить измерения практически всех плазменных параметров в наиболее полном объеме [1].

Авторами работы было впервые предложено проводить диагностику плазмы путем одновременного применения двух пассивных оптических методов: регистрации как спектров собственного излучения, так и изображений плазмы [13—16].

Метод одновременной регистрации спектров собственного излучения и изображений плазмы

Выбор для диагностики этих двух пассивных методов исследований определяется их универсальностью, так как они применимы для изучения практически любого газа и плазмы, отсутствием воздействия на исследуемый объект и максимальной информативностью. На основе оптических и спектральных данных можно найти пространственно-временные распределения большинства параметров плазмы в широких диапазонах их значений. Еще одним важным преимуществом этих методов является относительная простота их практической реализации.

Спектр излучения низкотемпературной плазмы в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах складывается из атомных и ионных спектральных линий, молекулярных электронно-колебательно-вращательных полос и электронного сплошного спектра. Анализ спектров позволяет определить или оценить множество параметров плазмы. При этом используются несколько моделей состояния плазмы, среди которых выделяется столкновительно-радиационная модель как наиболее универсальная.

Некоторые из основных параметров, определяемых при спектроскопической диагностике плазмы с применением различных моделей [1, 2, 12]:

- по интенсивностям соответствующих спектральных линий можно определить распределение заселенностей возбужденных уровней;

- по абсолютной интенсивности континуума спектра излучения плазмы может быть найдена концентрация электронов;

- распределение электронов по скоростям можно оценить по спаду интенсивности континуума в коротковолновой области спектра;

- ионный состав плазмы можно определить по отношению интенсивностей спектральных линий разных компонент.

Данный метод может быть использован не только в двухканальном исполнении, но и в многоканальных вариантах в зависимости от поставленных конкретных задач исследований. Одним из первых конкретных применений многоканальной методики была разработка схемы эксперимента по регистрации спектров оптического и рентгеновского излучения, возбуждаемого в плазменных каналах бесселевых пучков [13]. По двум каналам происходил вывод оптического излучения с последующей регистрацией спектров и изображений, а третий канал использовался для регистрации спектров в рентгеновском диапазоне.

Такое синхронное измерение позволяет получить намного больше информации о параметрах плазмы по сравнению с измерением каким-либо одним из методов и выявить возможную корреляцию между спектральными параметрами и деталями изображения. Данное обстоятельство является особенно важным при оптимизации рабочих режимов плазмохимических реакторов электрофизических установок. Кроме того, одновременная регистрация и обработка результатов экспериментов требует намного меньше времени по сравнению с последовательной регистрацией спектров и изображений, что особенно важно при исследовании низкотемпературной плазмы в плазмохимических реакторах больших объемов.

Применение метода для диагностики низкотемпературной плазмы, генерируемой плазмотронами в электрофизических установках, предназначенных для уничтожения вредных и токсичных веществ

В настоящее время во всем мире происходит стремительный рост отходов производства и потребления (промышленных, медицинских, биологических и т. д.), что обуславливает необходимость их уничтожения или утилизации. Традиционные методы, используемые при этом (например сжигание), сопровождаются существенным воздействием на окружающую среду, вызванным увеличением в атмосфере концентраций химически активных газовых компонентов техногенного происхождения. Причем изменение состава атмосферы происходит практически по всей ее толще, поэтому во всех промышленно развитых

странах мира с каждым годом все большее внимание уделяется поиску наиболее оптимальных научно-технических и технологических решений этой сложной проблемы [17, 18].

Одним из наиболее перспективных путей уничтожения отходов на современном этапе развития науки и техники является применение плазменных технологий. Использование на практике установок по уничтожению отходов, основанных на применении плазменных технологий, позволяет высокоэффективно и наиболее безопасно уничтожать вредные и токсичные вещества различного рода [19—25].

В настоящее время в области создания электрофизических установок, использующих плазмохимические технологии, основными проблемами являются задачи улучшения и оптимизации их технических и эксплуатационных характеристик. Решение этих задач невозможно без исследования характеристик плазмы, генерируемой в этих установках.

Блок-схема предложенного метода диагностики плазмы, генерируемой плазмотронами в электрофизических установках, предназначенных для уничтожения вредных и токсичных отходов [14—16], представлена на рис. 1. Отходы из устройства загрузки попадают через газонепроницаемый затвор в плазмохимический реактор. Плазмотрон генерирует плазменный факел, образующийся в результате пропускания плазмообразующего газа (например воздуха) через электрическую дугу, создаваемую в плазмотроне.

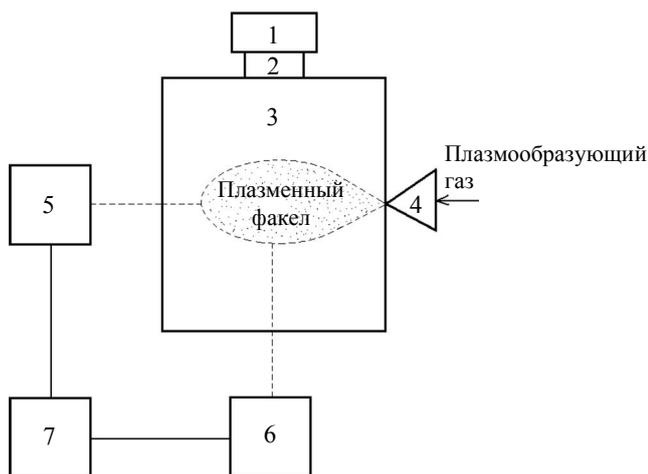


Рис. 1. Блок-схема метода одновременной регистрации спектров собственного излучения:

1 — устройство загрузки отходов; 2 — газонепроницаемый затвор; 3 — плазмохимический реактор; 4 — плазмотрон; 5 — аппаратура регистрации спектров; 6 — высокоскоростная камера; 7 — компьютер для сбора и анализа данных изображений плазмы

В результате взаимодействия такого плазменного факела с отходами образуется плазма слож-

ного состава, в которой протекают реакции самых разнообразных типов: реакции обмена ($AB + C = A + BC$), реакции термического распада молекул ($AB + X = A + B + X$), беспороговые реакции обмена тяжелых частиц, ион-молекулярные реакции с переходом тяжелых частиц, цепные реакции и многие другие. Число возможных реакций очень велико. Например, в водяном паре одновременно происходят более нескольких десятков самых разнообразных реакций с участием H_2O , H_2 , OH , HO_2 , H , O , H_2O^+ , OH^- , OH^+ , H^+ , O_2 , O_3 , H_2^- , O_2^- , O^- , O^+ и других ионов, молекул и радикалов [19].

Все эти реакции сопровождаются электромагнитным излучением в широком диапазоне длин волн. Это электромагнитное излучение выводится из плазмохимического реактора по двум каналам и затем регистрируется аппаратурой регистрации спектров и высокоскоростной камерой. Управление регистрирующей аппаратурой, сбор и анализ данных осуществляются с использованием компьютера.

Выбор аппаратуры для регистрации спектров

Для регистрации оптического диапазона спектра излучения плазмы была выбрана комбинация отображающего спектрографа и камеры на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС) исследовательского уровня [14, 15].

Отличительной характеристикой ПЗС-камер исследовательского уровня является низкий уровень шума считывания и сигнала темнового тока. Фотоны, падающие на поверхность фоточувствительного чипа ПЗС-камеры, генерируют фотоэлектроны, которые удерживаются в соответствующих элементах чипа. Таким образом, если спектр (или какой-либо двухмерный световой рисунок) спроецирован на чип, образуется соответствующий двухмерный зарядовый рисунок. Затем этот зарядовый рисунок переносится со светочувствительной области чипа в сдвиговый регистр, усиливается и передается через кабель управления/считывания на аналого-цифровой преобразователь, расположенный на интерфейсной плате, установленной в слоте компьютера. Затем спектр записывается в файл для дальнейшего анализа и хранения.

На сегодняшний день существуют два основных вида ПЗС-камер: на основе Si (кремний) и InGaAs (индий—галлий—мышьяк). Они различаются диапазоном спектральной чувствительности: ПЗС на основе Si покрывают диапазон 400—1100 или 180—1100 нм; ПЗС на базе InGaAs — 800—1700 нм. Диапазон спектральной чувствительности Si-ПЗС зависит от их конструкции. В ПЗС с фронтальным освещением фотон падает на чип, проходя сквозь решетку электродов. Поглощение в решетке элект-

тродов препятствует детектированию длин волн ниже 400 нм. Для работы устройства с фронтальным освещением в УФ-диапазоне можно нанести УФ-покрытие (фосфор), но оно обладает низкой квантовой эффективностью и может выцветать при падении интенсивных потоков УФ-излучения.

Как альтернатива УФ-пленке применяется утончение чипа с тыльной стороны (т. е. стороны, противоположной электродам) до 10—15 мкм (подобную толщину имеет светочувствительная область), при этом освещение происходит с этой стороны. Спектральный диапазон чувствительности ПЗС с тыльным освещением расширен в УФ-область до 180 нм. Недостатком такой конструкции является относительно высокая стоимость. Кроме того, возможно возникновение паразитной оптической интерференции, вызываемой наличием утонченного слоя.

ПЗС-устройства могут работать в различных режимах, достигая различных скоростей регистрации спектров. В режиме полного разрешения максимальная скорость составляет несколько спектров в секунду. Для повышения скорости применяется режим полного вертикального "слияния". В этом режиме все строки зарядов переносятся в регистр сдвига, и только после этого заряды переносятся из сдвигового регистра в усилитель. Слияние дает такие преимущества, как высокая скорость считывания и уменьшение шума. В режиме полного вертикального слияния можно регистрировать несколько сотен спектров в секунду.

Для повышения скорости регистрации спектров необходимо использовать сочетание ПЗС-устройства и отображающего спектрографа. Термин "отображение" в спектроскопии используют для описания поточечного соответствия входной щели и выходной плоскости спектрографа. Традиционные спектрографы генерируют только одномерный спектр в своей выходной плоскости, т. е. отсутствует разрешающая, или отображающая, способность перпендикулярно дисперсионной оси. Отображающие спектрографы имеют специально разработанные тороидальные зеркала, которые обеспечивают отображение входной щели на выходную фокальную плоскость.

Если на вход отображающего спектрографа подать световой сигнал через оптическое волокно диаметром 100 мкм, то при увеличении спектрографа, равном 1,6, в выходном поле спектрографа образуется спектральный сигнал с вертикальным размером 160 мкм, т. е., полагая размер пикселя ПЗС равным 26 мкм, он должен занимать около 6 рядов. В действительности в связи с несовершенством оптики спектрографа и погрешностями юстировки этот сигнал занимает около 10 рядов. Время вертикального сдвига строки зарядов может

достигать 1 мкс. Таким образом, можно достичь скорости до 10^5 спектров в секунду. Другим преимуществом отображающего спектрографа является возможность сбора нескольких спектров из разных пространственных точек одновременно. При этом ввод света в спектрограф осуществляется с помощью многоканального оптоволоконка.

Для дальнейшего увеличения скорости регистрации спектра необходимо использовать комбинацию так называемого "fast kinetics" ПЗС и отображающего спектрографа. Такой ПЗС имеет фоточувствительный чип с металлической маской, нанесенной на его поверхность. Маска нанесена таким образом, что только одна верхняя строка остается незакрытой. Строки сдвигаются в направлении сдвигового регистра до тех пор, пока вся неосвещенная часть чипа не будет заполнена зарядовыми пакетами. После этого начинается процесс строчного считывания. Для таких типов ПЗС можно достичь скоростей порядка 10^6 спектров в секунду.

Для нашего эксперимента были выбраны две ПЗС-камеры. Первая ПЗС-камера была с тыльным освещением и диапазоном спектральной чувствительности 180—1100 нм. Формат 1024×256 пикселей, размер пикселя 26×26 мкм. Вторая — "fast kinetics" ПЗС-камера, имеющая те же характеристики, что и первая, за исключением наличия маски. Металлическая маска нанесена таким образом, что незакрытыми оставлена одна верхняя строка и 128 нижних строк в той области ПЗС, которая граничит со сдвиговым регистром. Такая конструкция позволяет использовать данную ПЗС также и в обычном режиме работы при освещении незакрытых 128 строк. Для эксперимента также был подобран отображающий спектрограф.

Выбор аппаратуры для регистрации изображений

Параметры плазмы, генерируемой плазматронами в плазмохимических реакторах, меняются очень быстро во времени. Это обуславливает необходимость применения высокоскоростных устройств регистрации изображений плазмы. Современные высокоскоростные устройства регистрации разделяются на две основные категории: полностью электронные камеры и камеры с механической разверткой.

Основным элементом электронных камер является электронно-оптический преобразователь (ЭОП) изображения, который преобразует оптические фотоны в массив электронов, соответствующий оптическому изображению. Это электронное изображение электростатически фокусируется, отклоняется и прерывается для получения записи. Немеханическое манипулирование изображением

позволяет получить экстремально высокую скорость записи и обеспечивает гибкость в выборе моментов запуска и длительности экспозиции. Фосфорный экран ЭОП воссоздает оптическое изображение путем обратного преобразования электронов в фотоны, которые регистрируются фотопленкой или прибором зарядовой связи.

В механических камерах используются движущие части и оптика для формирования изображения. Основная часть большинства механических камер — многогранное зеркало, вращающееся с очень большой скоростью, отражая свет от объекта на фоточувствительный узел. В связи с требованием точной временной синхронизации используется специальный генератор запусков и временных задержек. Традиционные затворы слишком медленны для измерения временных интервалов экспозиций, но могут быть полезны для предотвращения замутнения пленки и регистрации статических изображений для сравнения. Серьезным недостатком механических камер является изнашиваемость деталей.

Как в ЭОП, так и в механических камерах в качестве средства фоторегистрации можно использовать как фотопленку, так и ПЗС. Существенными недостатками фотопленки являются одноразовость пленки как регистрирующей среды и необходимость проведения трудоемких процедур проявления пленки и оцифровки пленочных изображений для их последующего изучения и обработки. ПЗС свободен от этих недостатков. Недостатком ПЗС является то, что при очень высоких скоростях регистрации (порядка миллиона кадров в секунду) нужно использовать индивидуальный ПЗС для регистрации каждого последующего кадра в серии, поэтому общее число кадров, регистрируемых ПЗС, ограничено как по техническим, так и по ценовым причинам.

Регистрировать изображения также возможно непосредственно с помощью ПЗС. В этом случае свет падает на фоточувствительный чип через объектив, проецирующий изображение объекта на чип. Для того чтобы воспользоваться полной разрешающей способностью ПЗС, необходимо сдвигать зарядовые строки по одной в регистровый сдвиг, а затем передавать зарядовые пакеты в усилитель также построчно. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будут считаны все зарядовые строки. Такой способ намного дешевле, чем использование ЭОП или механической камеры. Неизбежной платой здесь является снижение частоты кадров и увеличение минимального времени экспозиции.

Для получения очень короткого времени экспозиции используется интенсифицированный ПЗС. Этот прибор представляет собой комбинацию

ЭОП и ПЗС, соединенных оптоволоконном. При падении фотона на фотокатод ЭОП генерируется фотоэлектрон, который в электрическом поле движется к микроканальной пластине. Внутри этой пластины первичный фотоэлектрон порождает лавину вторичных электронов. Результирующее усиление составляет 10^4 — 10^6 . При подаче положительного относительно входа микроканальной пластины потенциала на фотокатод фотоэлектроны не будут эмитироваться и ЭОП будет закрыт. Соответствующая затворяющая электроника может осуществлять переключение между положениями "открыто" и "закрыто" менее чем за 1 нс, что позволяет варьировать размер оптического строба в диапазоне от 1 нс до бесконечности.

Недостатком интенсифицированного ПЗС является низкая кадровая частота, потому что в качестве устройства регистрации используется ПЗС. Еще одним недостатком является уменьшение диапазона спектральной чувствительности, определяемого материалом фотокатода.

Для нашего эксперимента была выбрана высокоскоростная камера с прямой регистрацией изображения на ПЗС-чипе. Диапазон спектральной чувствительности 400—1100 нм. Формат 625×496 пикселей. Чип разбит на четыре квадранта, так что каждый квадрант считывается в собственный сдвиговый регистр. Такая схема увеличивает кадровую частоту в четыре раза. Скорость записи варьируемая, максимальная скорость в несколько тысяч кадров в секунду при пониженном разрешении 20×40 пикселей. Изображения записываются непосредственно в память камеры, а затем переносятся на жесткий диск компьютера. Камера оснащена электронно-контролируемым объективом с переменным фокусным расстоянием.

Для регистрации изображений плазмы также был выбран интенсифицированный ПЗС с диапазоном спектральной чувствительности фотокатода 180—850 нм и временем оптического строба < 5 нс.

Экспериментальная установка для одновременной регистрации спектров собственного излучения и изображений плазмы

На рис. 2 представлена разработанная авторами схема экспериментальной установки, предназначенной для одновременной регистрации спектров излучения и изображений плазмы [14—16]. Электромагнитное излучение широкого спектрального диапазона излучается плазмой и выходит из плазмохимического реактора через два диагностических окна. Излучение, вышедшее через первое окно, попадает в спектрограф, диспергирует и результирующий спектр регистрируется ПЗС-камерой. Излучение, вышедшее через другое окно, регистри-

руется высокоскоростной камерой. Электрические сигналы с выходов ПЗС и высокоскоростной камеры подаются на соответствующие входы компьютера для оцифровки, обработки и хранения.

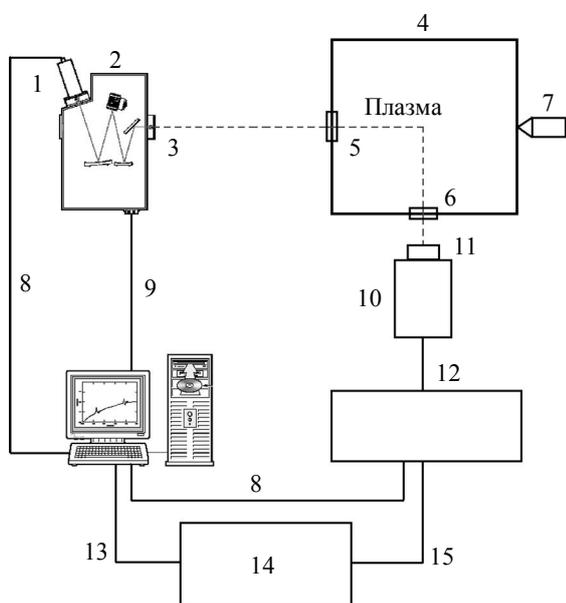


Рис. 2. Схема эксперимента по одновременной регистрации спектров излучения и изображений плазмы:

1 — ПЗС; 2 — спектрограф; 3 — устройство ввода излучения; 4 — плазмохимический реактор; 5, 6 — окна; 7 — плазмотрон; 8 — кабель управления/считывания; 9 — кабель управления спектрографом; 10 — высокоскоростная камера; 11 — объектив; 12 — блок управления; 13 — кабель синхронизации; 14 — устройство ввода/вывода; 15 — кабель запуска высокоскоростной камеры

Анализ данных, полученных с применением предложенного метода, позволит находить как оптимальные режимы работы существующих плазмохимических реакторов, так и оптимальное число и пространственное расположение плазмотронов в разрабатываемых реакторах. Оптимизация в данном случае означает: достижение максимальной эффективности уничтожения веществ, увеличение скорости уничтожения, уменьшение потребления электроэнергии и расходных химикатов и достижение целого ряда других положительных эффектов. Возможно также использование выходных сигналов комплекса регистрирующей аппаратуры для управления режимами работы плазмотронов в реальном времени, т. е. создание плазмохимического реактора с обратной связью.

Заключение

Предложен новый метод пассивной оптической диагностики плазмы, состоящий в одновременной регистрации как спектров собственного излучения так и изображений плазмы. Разработана схема экспериментальной установки, реализующей предло-

женный метод в плазмотронных электрофизических установках, предназначенных для уничтожения вредных и токсичных отходов.

Литература

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы/ Под ред. В. Е. Фортова. — М.: Наука, 2000. Вводный том II.
2. Энциклопедия низкотемпературной плазмы/ Под ред. В. Е. Фортова. — М.: Янус-К. 2006. Том V—1: Диагностика низкотемпературной плазмы.
3. Mazouffre S., Engeln R., Vankan P., Schram D. C. Two-photon laser induced fluorescence spectroscopy: a powerful diagnostic tool to monitor ground-state atom properties in a plasma environment// Workshop on Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics IV. Rolduc, Netherlands. 2001.
4. Czarnetzki U., Miyazaki K., Kajiwara T., Muraoka K., Maeda M., Döbele H. F. Comparison of various two-photon excitation schemes for laser-induced fluorescence spectroscopy in atomic hydrogen// Journal of the Optical Society of America B. 1994. V. 11. No. 11. P. 2155.
5. Amorim J., Baravian G., Jolly J. Laser-induced resonance fluorescence as a diagnostic technique in non-thermal equilibrium plasmas// Journal of Physics D: Applied Physics. 2000. V. 33. No. 9. P. R51.
6. Kono A., Nakatani K. Efficient multichannel Thomson scattering measurement system for diagnostics of low-temperature plasmas// Review of Scientific Instruments. 2000. V. 71. No. 7. P. 2716.
7. Sorokine M., Hayashi D., Stoffels W. W., Kroesen G. M. W. Voltage, current and electron density measurements in an air radio-frequency plasma// Workshop on Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics IV. Rolduc, Netherlands. 2001.
8. Maurice C., Feijen F. H. R., Kroesen G. W. M. Langmuir probe measurements in an ICP// Workshop on Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics IV. Rolduc, Netherlands. 2001.
9. Bryant P., Dyson A., Allen J. E. Langmuir probe measurements of weakly collisional electronegative RF discharge plasmas// Journal of Physics D: Applied Physics. 2001. V. 34. No. 1. P. 95.
10. Лебедев Ю. А. Введение в зондовую диагностику плазмы пониженного давления. — М.: МИФИ, 2003.
11. Boulos Maher I. Diagnostics of Thermal Plasmas// Workshop on Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostic III. Saillon, Switzerland. 1999.
12. Очкин В. Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. — М.: Физматлит, 2010.
13. Железнов Ю. А., Хомич В. Ю. Разработка системы регистрации спектров излучения в оптическом и рентгеновском диапазонах, возбуждаемых в плазменных каналах бesselевых пучков// Препринт НТЦ УП РАН. — М., 1999.
14. Железнов Ю. А., Хомич В. Ю. Экспериментальные методы и комплекс аппаратуры для исследований плазмы создаваемой плазмотронами в электрофизических установках для защиты окружающей среды// Препринт Центра научного приборостроения Института проблем электрофизики РАН. — М., 2002.
15. Khomich V. Yu., Kumkova I. I., Zheleznov Yu. A. A new experimental technique for investigation of plasma generated with plasmotrons in electrophysical installations// Proceedings of the 12th International Congress of Plasma Physics. Nice, France. 2004. <http://hal.ccsd.cnrs.fr/ccsd-00003202/en/>.
16. Железнов Ю. А., Хомич В. Ю. Реализация нового метода оптической диагностики плазмы в электрофизических установках// Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 3. С. 90.
17. Recommendations for the Disposal of Chemical Agents and Munitions. — Washington D. C.: National Academy Press. 1994.

18. Hester R. E., Harrison R. M. Waste Incineration and the Environment. — Great Britain: The Royal Society of Chemistry, 1994.

19. Carter G. W., Tsangaris A. V. Plasma gasification of biomedical waste// Proceedings of International Symposium on Environment Technological Plasma System and Applications. Atlanta, Georgia USA, 1995.

20. Rutberg Ph. G., Safronov A. A., Bratsev A. N., Ufimtsev A. A. Application of ac powerful plasma generators in plasma chemical technologies of toxic waste treatment// TPP-5, Fifth European Conference on thermal plasma processes. — St.-Petersburg, 1998. P. 294.

21. Rutberg Ph. G., Safronov A. A., Bratsev A. N., Ufimtsev A. A. Plasma Installations for the Destruction of High Toxic Medical Waste// ElectroMed 99. First International Symposium on Non-thermal Medical/Biological Treatments Using Electro-

magnetic Fields and Ionized Gases. — Norfolk, Virginia, 1999. P. 125.

22. Rutberg Ph. G., Bratsev A. N., Safronov A. A., Surov A. V., Shegolev V. V. The Technology and Execution of Plasmachemical Disinfection of Hazardous Medical Waste// IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. V. 30. No. 4. P. 1445.

23. Rutberg Ph. G. Plasma pyrolysis of toxic waste// Plasma Physics and Controlled Fusion. 2003. V. 45. P. 957.

24. Tzeng C. C., Hung T. M., Lin L. F. Plasma destructor// Nuclear Engineering International. July 2004. P. 30.

25. Gomez E., Amutha R. D., Cheeseman C. R., Deegan D., Wise M., Boccaccini A. R. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review// Journal of Hazardous Materials. 2009. V. 161. No. 2—3. P. 614.

Experimental technique of passive optical diagnostics of plasma

Yu. A. Zheleznov, V. Yu. Khomich

Institute for Electrophysics and Electric Power of RAS, 18 Dvortsovaya embankment,
Sankt-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: machine@mail15.com

The article describes an experimental technique of passive optical diagnostics of plasma and apparatus designed for practical implementing the technique. The technique is based on simultaneous registration of both plasma images and spectra of its own radiation followed by analysis of registered data. The technique can be used for diagnostics of plasma generated with a variety of methods: electric gas discharge, laser radiation, shock wave, explosion etc.

PACS: 52.70.Kz

Keywords: optical diagnostics of plasma, plasma radiation spectra, plasma image, plasmatron.

Bibliography — 25 references.

Received February 10, 2011