

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО
И УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 533.9.07:544.558

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УСТАНОВКА
ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ФИЗИКЕ
И ТЕХНИКЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЫ

© 2024 г. М. Н. Васильев^{a,*}, Т. М. Васильева^{b,**}

^aОбъединенный институт высоких температур Российской академии наук
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 12, стр. 2

^bМосковский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)
Россия, 141701, Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., 9

*e-mail: mvasiliev2006@rambler.ru

**e-mail: tmvasilieva@gmail.com

Поступила в редакцию 13.03.2023 г.

После доработки 01.06. 2023 г.

Принята к публикации 02.07.2023 г.

Приводится описание созданной в МФТИ установки для демонстрационных и учебных экспериментов, иллюстрирующих физические явления, которые происходят при генерации плазмы инъекцией электронных пучков в плотные газообразные среды и аэрозоли. Установка оснащена многофункциональной рабочей камерой с набором сменяемых элементов, что позволяет демонстрировать разнообразные эффекты, наблюдаемые при взаимодействии электронно-пучковой плазмы с веществом в широком диапазоне условий. Аппаратно-программный комплекс, управляющий работой установки и диагностическими средствами, обеспечивает накопление и компьютерную обработку первичных данных, поддерживает совместимость аппаратуры со стандартными и специально разработанными системами визуализации, что позволяет использовать установку для демонстраций как в офлайн-, так и в онлайн-форматах.

DOI: 10.31857/S0032816224010286, EDN: DTISKC

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных способов генерации низкотемпературной плазмы плазма, возбуждаемая инъекцией электронных пучков в плотные газообразные среды (так называемая электронно-пучковая плазма (ЭПП)), занимает особое место благодаря своим уникальным свойствам. Электронный пучок удается инжектировать в плазмообразующие среды практически любого химического состава в широком диапазоне давлений (от долей Торр до атмосферного и даже более высоких давлений). При этом не происходит контракция плазменного объема, характерная для газоразрядной плазмы. В плазмообразующий газ можно вводить мелкодисперсные добавки в виде распыленных порошков или жидкостей, создавая плазму

аэрозолей. Как правило, не возникают значимые технические трудности при внесении в ЭПП каких-либо макроскопических тел, например, с целью пучково-плазменной модификации их поверхности.

Принцип генерации и общие свойства ЭПП хорошо известны [1]. При прохождении быстрых электронов через плотный газ электронный пучок рассеивается и деградирует в упругих и неупругих столкновениях с молекулами газа; при неупругих столкновениях происходят ионизация газа и его возбуждение, т.е. генерируется ЭПП. Форма и размеры плазменного облака определяются параметрами первичного электронного пучка (начальной энергией электронов E_b и током пучка I_b), химическим составом и давлением плазмообразующего газа P_m .

Обратные плазменные процессы (рекомбинация, тушение возбужденных состояний и др.) сопровождаются нагревом газа и эмиссией излучений различной природы в диапазонах длин волн от инфракрасного до рентгеновского. Это делает пучково-плазменное образование объектом, удобным для визуального наблюдения и изучения с помощью достаточно простых средств оптической диагностики. Энерговыведение в ЭПП объемное, его плотность определяет многие прямые и обратные плазменные процессы и опосредованно интенсивность излучения различных зон плазменного облака. Плотность энерговыведения имеет максимум на некотором расстоянии от точки инъекции, положение которого зависит от характеристик электронного пучка и плазмообразующей среды.

Состав ЭПП сложен: в ней имеется электронная компонента (электроны первичного пучка и вторичные плазменные электроны), а также нарабатываемые в многочисленных и разнообразных плазменных процессах тяжелые частицы (ионы и нейтральные частицы) в основном и возбужденном состоянии. Для плазмы достаточно сложных молекулярных газов и паров характерно образование радикалов. Если ЭПП контактирует с какой-либо поверхностью, то в составе приповерхностной плазмы обычно присутствуют частицы, эмитируемые поверхностью: электроны, частицы, образовавшиеся в результате реактивного распыления или испарения материала, продукты гетерофазных плазмохимических реакций.

Функция распределения электронов по энергиям в ЭПП немаксвелловская, а сама плазма является сильнонеравновесной. Нарботка в плазменном объеме многочисленных и разнообразных тяжелых частиц, способных вступать в сложные плазмохимические реакции между собой и с поверхностью макроскопических тел или мелкодисперсных частиц, делает ЭПП химически активной.

Таким образом, ЭПП представляет собой сложный объект, интересный как для фундаментальных исследований, так и с точки зрения технических и технологических приложений. Наблюдаемые физические явления и закономерности процессов в пучково-плазменных системах имеют выраженную специфику и,

что важно, могут быть продемонстрированы без сложного диагностического оборудования. Для таких демонстраций на базе известного генератора ЭПП [2] была разработана лабораторная установка, способная воспроизводить условия, наиболее часто встречающиеся в реальных пучково-плазменных системах исследовательского и технологического назначения, а именно:

- непрерывную и импульсно-периодическую генерацию ЭПП в свободном пространстве и в замкнутом объеме при форвакуумном давлении;
- термическое и нетермическое взаимодействие ЭПП с поверхностью макроскопических твердых тел и с частицами мелкодисперсного аэрозоля, а также эмиссию излучений различной природы при таких взаимодействиях;
- электрофизические явления, которые наблюдаются в пучково-плазменных системах и часто являются критически значимыми для их функционирования.

Поставленная задача была решена дооснащением генератора ЭПП специальным модулем (рабочей камерой) с необходимыми для демонстраций конструктивными элементами, узлами и диагностическими средствами.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

2.1. Генератор электронно-пучковой плазмы

Способ генерации ЭПП иллюстрируется на рис. 1, на котором изображена принципиальная схема экспериментальной установки. Остросфокусированный электронный пучок 3 формируется в высоковакуумной камере 2 электронно-лучевой пушкой 1 и направляется на вход выводного окна 4, через которое он инжектируется в заполняемую плазмообразующим газом рабочую камеру 8. При этом формируется облако ЭПП 7.

Электронная пушка триодного типа питается от высоковольтного источника, управляемого контроллером электронного пучка. Контроллер обеспечивает регулировки ускоряющего напряжения пушки и силы тока пучка, поддерживая непрерывную или импульсно-периодическую генерацию ЭПП. Кроме этого, контроллер имеет опцию отклонения и сканирования пучка

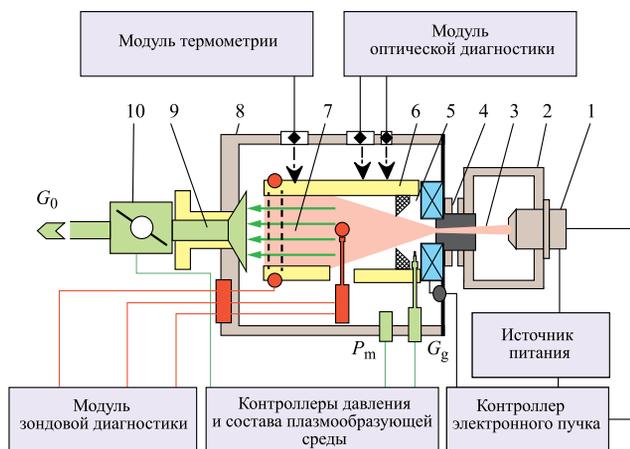


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – электронная пушка, 2 – высоковакуумная камера, 3 – электронный пучок, 4 – выводное окно, 5 – газовое сопло, 6 – контейнер, 7 – ЭПП, 8 – рабочая камера, 9 – откачная вакуумная магистраль, 10 – регулятор расхода газа.

внутри рабочей камеры с помощью двухкоординатной электромагнитной системы, установленной на выходе из выводного окна.

Диапазоны регулировок режимов работы установки таковы: $E_b = 20\text{--}30$ кэВ, $I_b = 1\text{--}100$ мА, $P_m = 10^{-2}\text{--}10^2$ Торр. В качестве плазмообразующих газов в учебных экспериментах обычно применяются воздух и инертные газы, однако, для демонстрации плазмохимических эффектов иногда требуются другие газы, такие как кислород, метан, гексафторид серы (SF_6). Для демонстрации электрофизических явлений полезной оказывается инъекция в плазменное облако частиц распыленных порошков или жидкостей, при этом генерируется аэрозольная ЭПП.

Важно, что ЭПП можно возбуждать и в свободном объеме, и внутри какого-либо контейнера, локализирующего плазменный объем. В последнем случае имеет место контакт ЭПП со стенками контейнера, сопровождающийся разнообразными приповерхностными процессами электрофизической и плазмохимической природы. Аналогичные процессы происходят и при контакте ЭПП с поверхностью образца (мишени), если этот образец помещен в плазменное облако или плазменный поток. Бомбардировка быстрыми электронами частиц аэрозоля, мишеней и стенок контейнера приводит к накоплению ими значительного

электростатического потенциала, обычно отрицательного, что порождает сильное кулоновское взаимодействие в плазменном объеме.

2.2. Рабочая камера и диагностический комплекс

Для демонстрационных экспериментов конструкция рабочей камеры и ее внутренняя оснастка являются наиболее важными, поскольку именно они обеспечивают наглядную иллюстрацию разнообразных явлений, которые протекают при взаимодействии электронного пучка с плотной средой (газом, жидкостью, твердым телом, аэрозолем). Многофункциональная камера, специально разработанная для таких демонстраций, имеет набор сменяемых элементов под конкретные экспериментальные задачи. Размер камеры $350 \times 350 \times 350$ мм³.

Внутри рабочей камеры 8 могут быть установлены контейнеры 6 различной геометрии. На рис. 1 изображен вариант контейнера в виде цилиндрической трубки. Электронный пучок инжектируется вдоль трубки через один из ее торцов. Диаметр контейнера варьируется от 10 до 200 мм, а длина – от 100 до 300 мм. Контейнер может быть изготовлен из металлических и диэлектрических материалов.

На ближнем к выводному окну торце контейнера устанавливается сопло 5 с адаптерами под различные диаметры трубки, которое формирует в ней поток плазмообразующего газа. Величина расхода газа G_g задается программируемым натекателем. Через противоположный открытый торец контейнера газ выбрасывается в полость рабочей камеры, соединенной с вакуумным насосом (на рисунке не показан) магистралью 9 через пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор 10. Регулятор управляет производительностью откачки G_0 . Подбором величин G_g и G_0 можно устанавливать требуемые скорость потока и величину статического давления в контейнере (которое в данной компоновке, очевидно, равно давлению в рабочей камере P_m). Все перечисленные регулировки выполняются контроллерами плазмообразующей среды по загружаемым в них алгоритмам.

Стенки контейнера имеют отверстия, на которых размещаются инжекторы для диспергирования в ЭПП порошков или жидкостей, если требуется создать аэрозольное пучково-плазменное

образование. Разработаны различные варианты инжекторов как для механического распыления в неподвижном газе (центробежные форсунки, вибрирующие сита, ультразвуковые распылители и др.), так и для распыления газовым потоком (струйные форсунки, пневматические диспергирующие устройства).

Рабочая камера оснащена набором герметичных оптических и электрических вводов, адаптированных к сигналам от расположенных внутри камеры сенсоров системы диагностики. В стенках камеры имеются радиационно-защищенные окна для визуального наблюдения за происходящими в ней процессами и при необходимости для их фото- или видеофиксации, поскольку многие из упомянутых выше явлений (в частности, локализация зон максимального энерговыделения и аномально высокая зарядка частиц аэрозоля [3] в ЭПП) хорошо видны невооруженным глазом.

Измерения важных для понимания физики ЭПП величин, например величины потенциала, который накапливается частицами аэрозоля или макроскопическим телом, помещенным в ЭПП, требуют приборного оснащения. Для таких демонстраций предназначена система специально разработанных электрических зондов, вводимых непосредственно в ЭПП или размещаемых на стенке контейнера. На рис. 1 показан модуль диагностики с неподвижным зондом, находящимся в плазме, и внешним зондом – металлическим кольцом, охватывающим диэлектрический контейнер.

Демонстрации тепловых эффектов в ЭПП требуют температурных измерений, для которых предназначен модуль термометрии. Так, например, нагрев тел, помещенных в неподвижное облако или в поток ЭПП, удается регистрировать термосенсорами, которые устанавливаются в различных точках стенки контейнера или на поверхности мишени (см. раздел 3.4). Стандартные контактные термосенсоры (термопары, терморезисторы и т.п.) конструктивно адаптированы к работе в условиях интенсивной бомбардировки быстрыми электронами. Для демонстрации нестационарных тепловых процессов в ЭПП сигналы с термосенсоров удобно выводить на работающий в режиме реального времени многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Следует отметить, что

возможная электростатическая зарядка термосенсоров в ЭПП требует специальной защиты входов АЦП.

Наиболее методически сложной для демонстрации является регистрация спектров излучения ЭПП и тел, контактирующих с ней (см. разд. 3.3). Использовались оптоволоконные спектрометры, работающие в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Регистрируемые спектры выводятся на монитор компьютера в графическом и цифровом форматах. Кроме спектрометров, в модуле оптической диагностики имеются LCD фото- и видеокамеры, изображения с которых также передаются на компьютер. Загруженное в компьютер программное обеспечение поддерживает совместную работу спектрометров, а также дает возможность обрабатывать спектры и изображения в режиме реального времени.

Плазмохимические эффекты могут проявлять себя различными способами, однако наиболее просто и наглядно их можно продемонстрировать, сравнивая состояние поверхности какого-либо образца до и после пучково-плазменного воздействия. Иногда различия в цвете или структуре поверхности этих образцов можно наблюдать визуально. Еще одним весьма наглядным эффектом воздействия ЭПП на материалы является изменение их гидрофильно-гидрофобных свойств. Этот эффект проявляется как увеличение или уменьшение контактного угла смачивания поверхности образца (например, полимерной пленки или ткани) в результате пучково-плазменного воздействия. Качественно изменение капиллярности и смачиваемости образцов часто видно невооруженным глазом (см. разд. 3.4).

3. ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

3.1. Генерация электронно-пучковой плазмы в различных условиях

На рис. 2 дана фотография неподвижного плазменного облака, образующегося в контейнере диаметром 300 мм, заполненном воздухом при давлении $P_m = 0.5$ Торр. В этой же конфигурации удобно продемонстрировать и приповерхностную ЭПП, для чего в плазменном облаке размещается какое-либо тело (обычно



Рис. 2. Генерация ЭПП воздуха в свободном пространстве и вблизи поверхности нагретого металлического диска, $P_m = 0.5$ Торр.

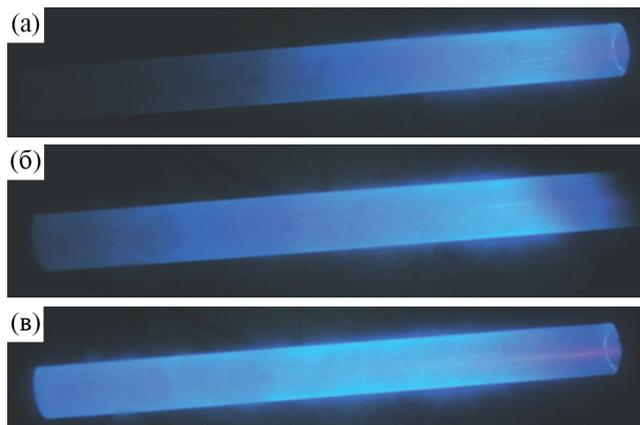


Рис. 3. Генерация ЭПП воздуха в кварцевой трубке диаметром 20 мм: **а** – $P_m = 5.0$ Торр; **б** – $P_m = 2.5$ Торр; **в** – $P_m = 1.0$ Торр.

простейшей геометрии: диск, сфера или конус). Плазма вблизи поверхности титанового диска, нагретого до температуры около 900 К, хорошо видна на том же рисунке. Чтобы показать особенности возбуждения приповерхностной плазмы в условиях электростатической зарядки макроскопических тел (см. разд. 3.2), в качестве мишеней можно использовать диэлектрические материалы, например керамики. Держатели мишеней имеют опцию подключения/отключения заземления образцов.

Генерация ЭПП внутри прозрачного цилиндрического контейнера иллюстрируется рис. 3. На фотографии хорошо видна зона плазменного облака с максимальной интенсивностью

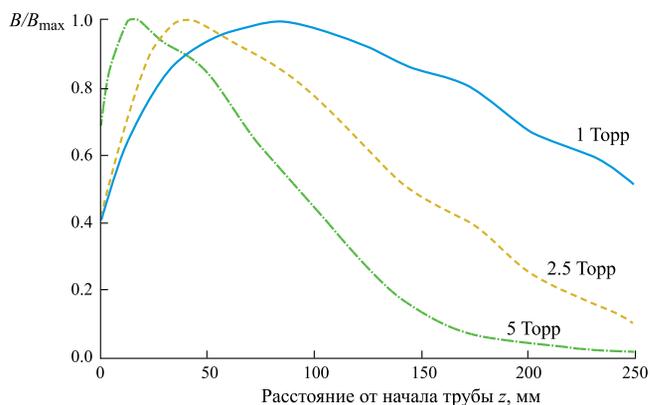


Рис. 4. Продольные профили интенсивности свечения ЭПП в кварцевой трубке диаметром 20 мм при различных значениях давления воздуха (компьютерная обработка экспериментальных данных).

свечения, т.е. зона максимального объемного энерговыделения. Положение этой зоны относительно плоскости инъекции электронного пучка зависит от давления плазмообразующего газа: с ростом давления она смещается в направлении выводного окна, что хорошо видно на графиках, представленных на рис. 4, которые получены в автоматическом режиме при плавном изменении давления P_m в диапазоне 0.5–5.0 Торр. Алгоритм изменения P_m предварительно загружается в контроллер давления плазмообразующей среды (рис. 1). Варьируя с помощью контроллера электронного пучка ускоряющее напряжение электронной пушки и используя плазмообразующие газы с сильно различающейся плотностью (например, гелий и аргон), можно проиллюстрировать ряд важных физических закономерностей, характеризующих движение быстрых электронов в плотной среде [4].

3.2. Электростатическая зарядка макроскопических тел и частиц аэрозоля в электронно-пучковой плазме

Электростатическая зарядка объектов, находящихся в ЭПП (например, макроскопических мишеней, частиц аэрозоля) или контактирующих с ней (например, стенку контейнера), существенным образом влияет на формирование плазменного объема и протекающие в нем физические процессы. Наиболее просто можно продемонстрировать электростатические эффекты, наблюдая за разлетом частиц облака аэрозоля, в которое инжектируется электронный пучок

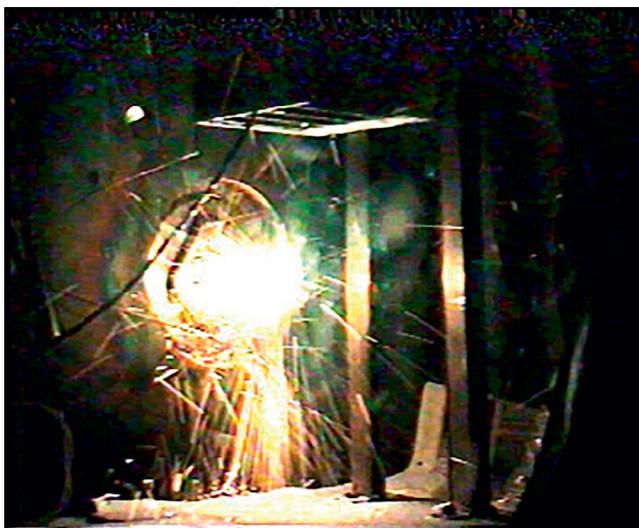


Рис. 5. Разлет облака аэрозольных частиц Al_2O_3 при $P_m = 0.2$ Торр, плазмообразующий газ – воздух.

(рис. 5). В этом эксперименте частицы порошка сыплются сверху сквозь облако ЭПП из вибрирующего сита [1]. За время пребывания в плазме эти частицы успевают накопить заряд (как правило – отрицательный), достаточный для возникновения сильного кулоновского взаимодействия между ними [3]. Интенсивность разлета зависит от давления плазмообразующего газа: по мере повышения P_m интенсивность разлета снижается. При достаточно высоких давлениях (в диапазоне $P_m = 1-3$ Торр в зависимости от состава плазмообразующего газа) разлет прекращается совсем.

В ходе демонстрационных экспериментов потенциал макроскопического тела в облаке ЭПП удастся измерить с помощью зондов, входящих в состав диагностического комплекса. Для регистрации зондовых сигналов удобнее всего использовать многоканальные аналого-цифровые преобразователи с высоким входным сопротивлением, которые позволяют одновременно записывать в виде графического изображения и количественно измерять сигналы с нескольких зондов, а также сигнал с вакуумметра рабочей камеры. На рис. 6 дана выведенная на монитор АЦП запись всех перечисленных сигналов при переменном давлении P_m . Кривые 2 и 3 соответствуют сигналам со сферического зонда, установленного внутри контейнера, и с внешнего кольцевого зонда, охватывающего кварцевую трубку; кривая 1 – сигнал, снимаемый с вакуумметрического преобразователя (VSM 7XDL).

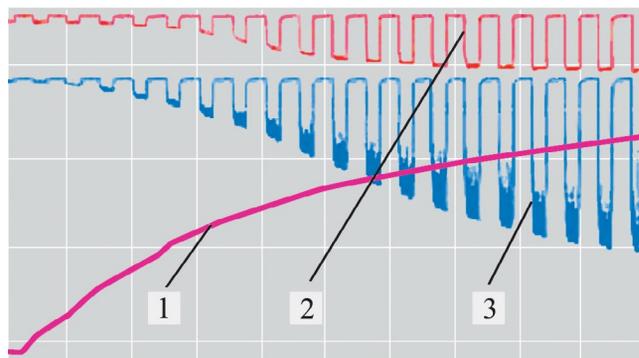


Рис. 6. Экран монитора АЦП при измерении потенциала сферического зонда (3) и кольцевого зонда (2) при генерации ЭПП воздуха в кварцевой трубке при переменном (падающем) давлении плазмообразующего газа (1).

В этих экспериментах электронная пушка работала в импульсно-периодическом режиме.

Используя проточный контейнер как один из вариантов сменной оснастки рабочей камеры, можно качественно охарактеризовать влияние аэродинамики на электрофизические процессы в ЭПП. Именно такая постановка эксперимента, в котором демонстрируется влияние обдува тела потоком ЭПП на его электростатическую зарядку, иллюстрируется на рис. 1. Скорость потока регулируется настройками контроллеров давления плазмообразующего газа и ПИД-регулятора.

3.3. Генерация излучений при работе пучково-плазменных установок

Практически все эксперименты с ЭПП сопровождаются эмиссией излучений различных длин волн. Оптическое излучение с линейчатым спектром возникает при деактивации возбужденных состояний молекул плазмообразующего газа; положение спектральных линий и их интенсивность определяются, главным образом, составом газа и его температурой. Модуль оптической диагностики (рис. 1), в котором имеются спектрометры ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов, позволяет наглядно показать спектры ЭПП всех газов, применяемых в демонстрационных экспериментах. В качестве примера на рис. 7 представлен исходный спектр излучения ЭПП азота, возбуждаемой в кварцевой трубке. Хорошо видна суперпозиция линейчатого спектра плазмы и непрерывного спектра люминесценции

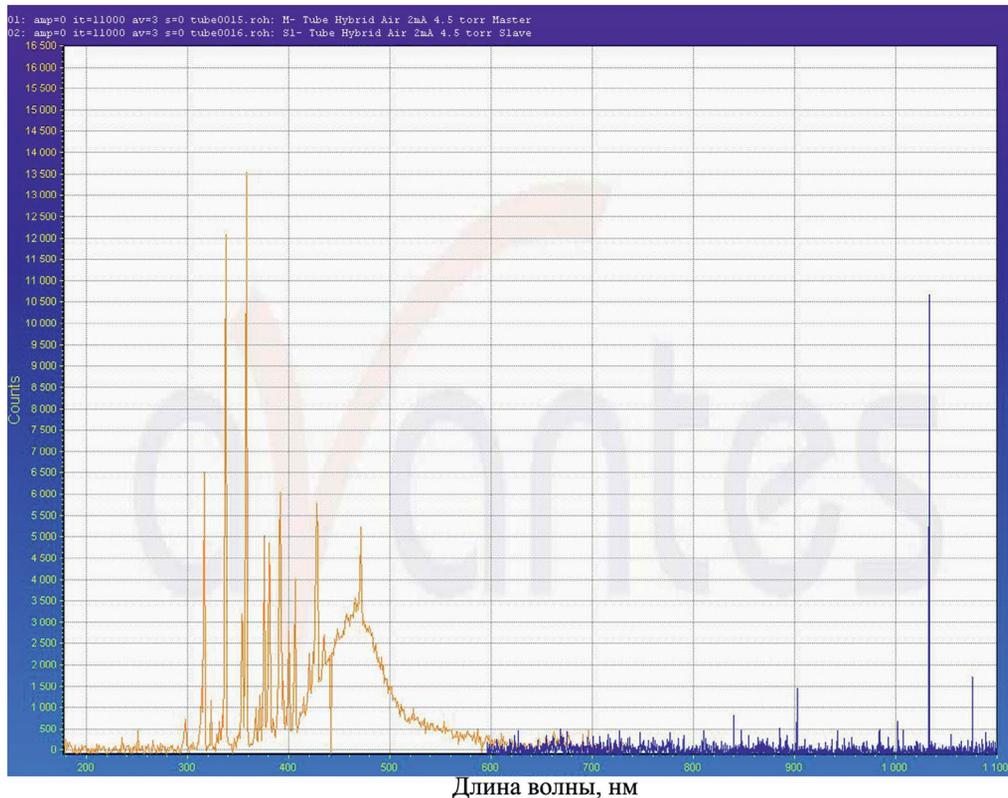


Рис. 7. Экран монитора спектрометра AvaSpec-2048 при регистрации оптического спектра излучения ЭПП азота, возбуждаемой в кварцевой трубке.

кварца в диапазоне 400–600 нм. Если трубка оказывается нагретой до нескольких сотен градусов Цельсия (такой режим реализуется при больших токах пучка ($I_b > 20$ мА) и достаточно высоких давлениях газа ($P_m > 10$ Торр)), то в ближнем инфракрасном диапазоне обнаруживается начало непрерывного спектра теплового излучения стенки контейнера.

Программное обеспечение модуля оптической диагностики позволяет отфильтровывать информативный сигнал от шума и предварительно идентифицировать спектральные линии. Так, компонентами, которые надежно регистрируются в ультрафиолетовой и видимой частях спектра ЭПП азота, являются молекулы N_2 и ионы N_2^+ . Примеры компьютерной обработки спектров ЭПП, возбуждаемой в люминесцирующем контейнере, можно найти в нашей работе [5]. Таким образом, в ходе экспериментов с ЭПП удастся не только продемонстрировать факт генерации оптического излучения с линейчатым и непрерывным спектрами, но и объяснить, каким образом можно идентифицировать излучения, присущие

различным процессам, которые происходят в рабочем объеме установки.

Для демонстрации генерации тормозного излучения при работе установки на наружной поверхности трубки устанавливается детектор, чувствительный к мягкому рентгеновскому излучению. Варьируя ток пучка и ускоряющее напряжение пушки, можно качественно охарактеризовать зависимость интенсивности тормозного излучения от параметров ЭПП. Такие эксперименты удобнее всего проводить, используя комбинацию зонд-детектор: зонд достаточно большого размера, изготовленный из тяжелого металла (например, вольфрама), располагается в поле диаграммы направленности детектора. Описанная комбинация является одним из вариантов оснастки рабочей камеры.

3.4. Теплофизические, химико-термические и плазмохимические явления при пучково-плазменном воздействии на вещество

В соответствии с общепринятыми физическими моделями нагрев плазмообразующего газа и контактирующей с ЭПП плотной

среды (жидкости или твердого тела) происходит за счет энерговыделения электронного пучка, а охлаждение – за счет различных механизмов теплоотдачи (теплопроводность, конвекция, излучение). Баланс подводимой и отводимой энергии определяет температуру среды. Для различных условий экспериментов модуль термометрии (рис. 1) обеспечивает регистрацию и динамические измерения температуры выбранных точек контейнера и объектов, находящихся в ЭПП. Применяя сменные контейнеры и мишени, удается продемонстрировать:

- динамику нагрева твердых образцов различной геометрии, помещенных в ЭПП, и фазовые переходы на их поверхностях;
- плазменно-стимулированный синтез химических соединений на поверхности материалов (например, синтез оксидов и нитридов титана на плоской поверхности и на внутренней поверхности труб);
- низкотемпературную модификацию поверхности материалов (например, изменение гидрофильно-гидрофобных свойств поверхности полимеров и биополимеров).

Комментируя физику этих процессов [6], можно продемонстрировать роль химического и фазового составов плазмообразующей среды и материала образца, влияние обдува образца потоком ЭПП; демонстрируются также влияние геометрии реакционного объема и возможности управления плазменными процессами за счет варьирования параметров ЭПП. Фотографии, сделанные в ходе таких экспериментов, можно найти в разделе “Дополнительные материалы”¹.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная в настоящей работе установка была создана на базе действующего экспериментального комплекса, дополненного специально

¹ Дополнительные материалы к статье размещены на сайтах <https://link.springer.com/> (английская версия) и <https://elibrary.ru> (русская версия).

разработанными модулями для демонстрации основных физических явлений и закономерностей при генерации электронно-пучковой плазмы и ее взаимодействия с материалами различной природы. Демонстрации достаточно зрелищные и наглядно иллюстрируют принципы конструирования пучково-плазменных систем и характерные для них рабочие процессы.

Необходимая для демонстрационных экспериментов диагностическая аппаратура относительно проста, допускает компьютерную обработку получаемых данных, совместима со стандартными средствами визуализации и позволяет использовать установку для учебных экспериментов, в том числе в онлайн-формате. Накоплен значительный опыт применения установки для выполнения студенческих индивидуальных и групповых научно-исследовательских проектов, а также в целях популяризации науки и перспективных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бычков В.Л., Васильев М.Н., Коротеев А.С.* Электронно-пучковая плазма. Генерация, свойства, применение. М.: Изд. МГОУ АО Росвузнаука, 1993.
2. *Васильева Т.М., Баяндина Д.В.* // ПТЭ. 2010. Т. 53. № 2. С. 142.
3. *Fortov V.E., Gavrikov A.V., Petrov O.F., Sidorov V.S., Vasiliev M.N., Vorona N.A.* // Europhys. Lett. 2011. V. 94. P. 55001.
<https://doi.org/10.1209/0295-5075/94/55001>
4. *Аброян И.А., Андронов А.Н., Тутов А.И.* Физические основы электронной и ионной технологии. М.: Высшая школа, 1984.
5. *Vasilieva T.M., Vasiliev M.N.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2021. V. 49. P. 3307.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3099959>
6. *Vasiliev M., Vasilieva T.* Materials production with Beam Plasmas // Encyclopedia of Plasma Technology. Boca Raton: Taylor & Francis, 2017. P. 152.
<https://doi.org/10.1081/E-EPLT-120054010>