

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЫ ФОРВАКУУМНОГО ДАВЛЕНИЯ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Ч.В. Дык, М.Н. Васильев

АННОТАЦИЯ

Исследовано продольное распределение интенсивности свечения стенки цилиндрического диэлектрического (кварцевого) контейнера, внутри которого генерировалась электронно-пучковая плазма воздуха или аргона при форвакуумном давлении. Было установлено, что интенсивность свечения имеет максимум, положение которого зависит от величины давления плазмообразующей среды, однако положение максимумов варьируется в зависимости от условий генерации плазмы и молекулярной массы плазмообразующего газа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК, ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ПЛАЗМА ФОРВАКУУМНОГО ДАВЛЕНИЯ

GENERATION OF ELECTRON-BEAM PLASMA OF FOREVACUUM PRESSURE INSIDE A CLOSED VOLUME

T.V. Duc, M.N. Vasiliev

ABSTRACT

The longitudinal distribution of the luminescence intensity of the wall of a cylindrical dielectric (quartz) container, inside which an electron-beam plasma of air or argon was generated at forevacuum pressure, was studied. It was found that intensity has maxima, the position of which depends on the pressure of the plasmagenerating medium, but the position of the maxima varies depending on the conditions of plasma generation and the molecular weight of the plasmagenerating gas.

KEYWORDS

ELECTRON BEAM, ELECTRON BEAM PLASMA OF FOREVACUUM PRESSURE

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость изучения генерации электронно-пучковой плазмы (ЭПП), т.е. плазмы, возбуждаемой при инъекции электронного пучка (ЭП) в плотную газообразную среду, в замкнутом объеме возникает при разработке плазмохимических реакторов, предназначенных для модификации материалов, плазмохимического синтеза и управляемой деструкции сложных органических и биоорганических соединений. С аналогичными задачами сталкиваются и при обработке внутренней поверхности полых изделий [1].

Наиболее простым для исследования случаем является генерация ЭПП внутри цилиндрического контейнера (реакционной камере), например, в металлической или диэлектрической трубке, в которой полностью или частично локализовано облако плазмы.

Важнейшей характеристикой плазменного объема является мощность энерговыделения в различных зонах реакционной камеры. Именно от этой величины зависят многие параметры плазменных процессов, протекающих в реакционном объеме, например, скорости плазмохимических реакций [2].

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование пространственного распределения энерговыделения ЭПП, генерируемой в диэлектрической трубке. Для этого изучалось оптическое излучение плазмы внутри прозрачной (кварцевой) трубки; предполагалось, что интенсивность излучения элемента плазменного объема (B) пропорциональна мощности энерговыделения в этом элементе.

В ходе исследования решались следующие задачи:

- Найти зависимость интенсивности излучения плазмы в различных сечениях трубки от расстояния z между выбранным сечением и точкой инъекции ЭП.
- Найти зависимость интенсивности излучения плазмы от давления плазмообразующего газа P_m в различных поперечных сечениях трубки (т.е. для различных z).
- Выявить зависимость распределения интенсивности излучения плазмы вдоль трубки от рода газа.

При этом, исходя из известных закономерностей рассеяния и торможения быстрых электронов в плотном газе, мы предполагали:

1. Существует значение давления плазмообразующего газа (P_m^*), при котором $B = B_{max}$.
2. Значение P_m^* зависит от z .
3. Значение P_m^* зависит от молекулярной массы плазмообразующего газа.
4. B_{max} зависит от рода плазмообразующего газа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рис.1 иллюстрирует постановку экспериментов. Тонкий электронный пучок (3), предварительно сформированный в высоковакуумной камере (2) электронной пушкой (1), инжектировался в заполненную плазмообразующим газом рабочую камеру (5) через выводное устройство (4) (газодинамическое окно). Отрезок кварцевой трубки (7) размещался в рабочей камере так, чтобы ее ось совпадала с осью инъекции пучка, а электронно-пучковая плазма (6) была локализована внутри трубки. Это обеспечивалось надлежащим выбором расстояния z_0 между трубкой и выводным окном. Оптическое излучение ЭПП регистрировалось фотодиодом (8), сигнал которого выводился на один из каналов двухлучевого компьютерного осциллографа (9). На второй канал осциллографа выводился сигнал с вакуумметра (10), который измерял давление P_m в рабочей камере (5). Величина P_m регулировалась по заданному алгоритму настройками натекателя (11) и контроллера (12) производительности вакуумной откачки.

В ходе экспериментов для некоторых сечений кварцевой трубки (z_1, z_2, z_3) в автоматическом режиме регистрировалась и записывалась в виде Excel-файла функция $B(P_m)$. Кроме этого через окно в стенке рабочей камеры (5) для нескольких давлений (P_{m1}, P_{m2}, P_{m3}) производилось фотографирование трубки ПЗС камерой. Для построения функции $B(z)$ полученные изображения обрабатывались специальной программой, написанной на языке Python. Эта программа позволяла вычислять интенсивность излучения ЭПП вдоль направления оси z по следующим шагам:

1. Загрузка изображения для цифровой обработки с помощью выбранной библиотеки для работы с растровой графикой (например, Pillow, Scikit-image и т.д.);

2. Определение координат трубки на изображении. Для этого можно выбрать любую строку пикселей по оси z , содержащую информацию, необходимую для вычисления интенсивности излучения;
3. Использование операции индексации в библиотеке Numpy для извлечения значений интенсивности пикселей выбранной строки.

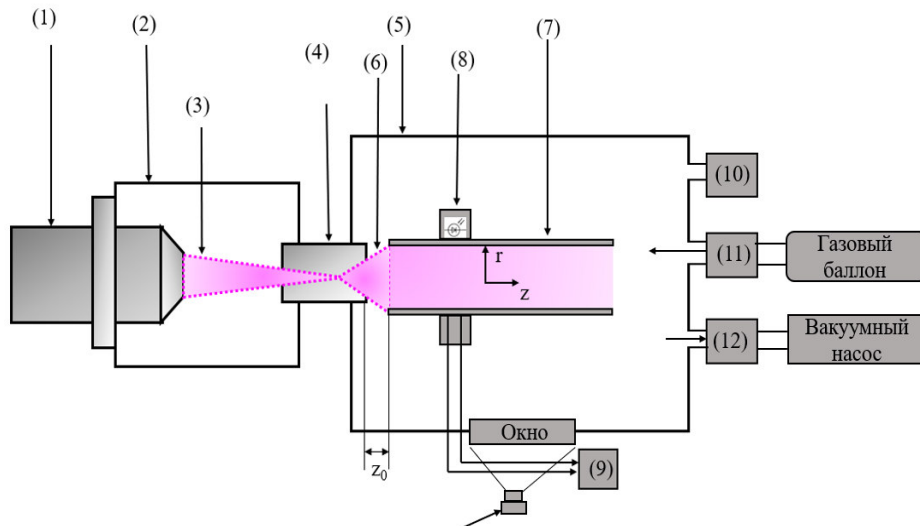


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: (1) – электронная пушка, (2) – высоковакуумная камера, (3) – электронный пучок, (4) – выводное окно, (5) – рабочая камера, (6) – облако электронно-пучковой плазмы, (7) – диэлектрический контейнер, (8) – фотодиод, (9) – осциллограф, (10) – вакуумметр, (11) – натекаль, (12) ПИД-регулятор

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

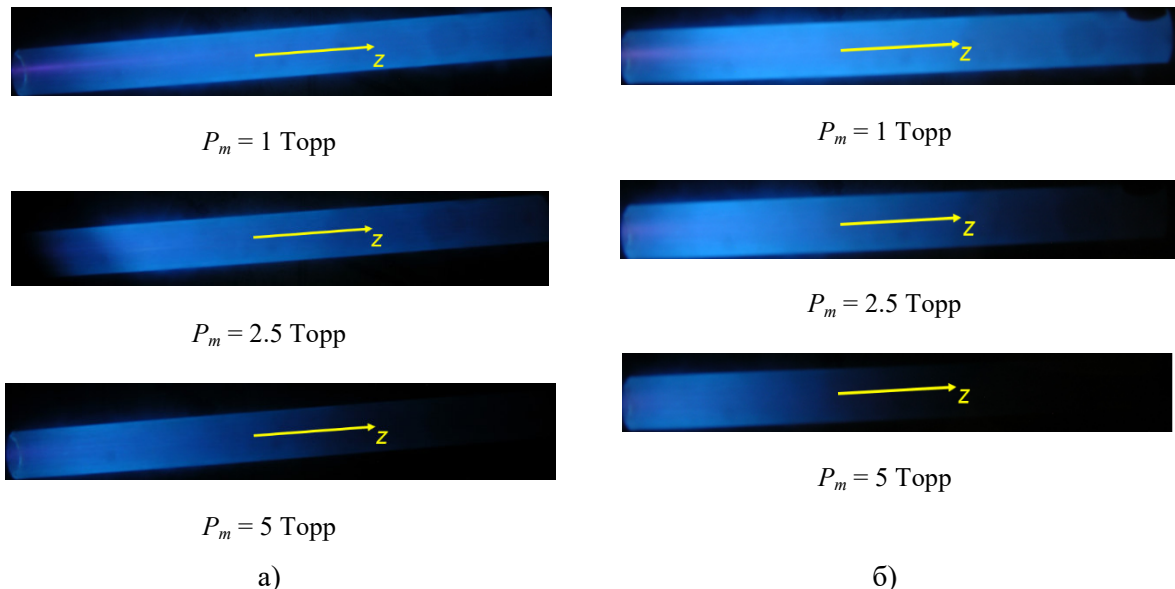


Рис. 2. Фотографии кварцевой трубки при различных давлениях плазмообразующего газа: а) воздуха; б) аргона

На рисунке 2 приведены фотографии кварцевой трубки, внутри которой возбуждается ЭПП воздуха (а) и аргона (б), для трех значений давления

плазмообразующего газа: $P_m = 1, 2.5$ и 5 Торр. Видно, что для обоих газов свечение трубки неравномерно по ее длине: наблюдается зоны с интенсивным и слабым свечением. Положение этих зон зависит от давления и состава плазмообразующего газа.

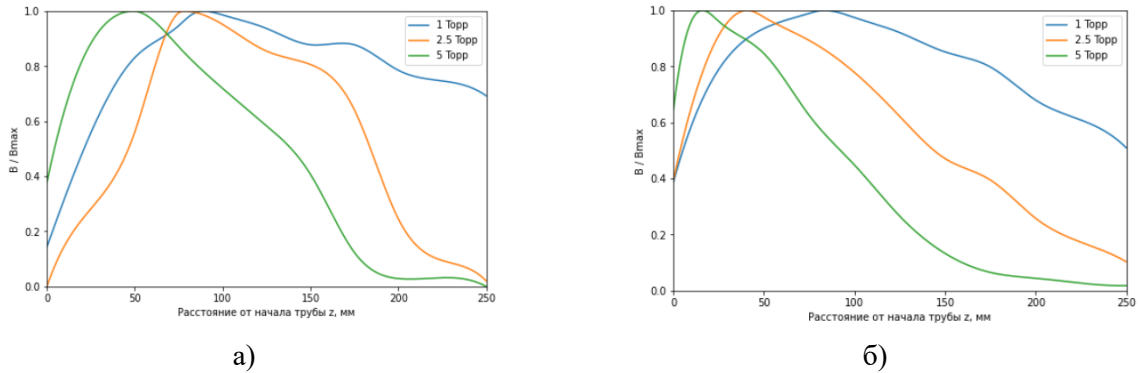


Рис. 3. B/B_{max} при разных z : а) воздух; б) аргон

Компьютерной обработкой изображений были получены продольные профили распределения интенсивности свечения трубки. На рисунке 3 эти профили представлены в виде безразмерного отношения B/B_{max} , где B_{max} – интенсивность излучения наиболее яркой точки изображения. Компьютерная программа автоматически определяет положение этой точки. Видно, что по мере роста давления максимум распределения смещается в сторону выводного устройства (т.е. точки инъекции ЭП в камеру). При одном и том же давлении газа максимум функции B/B_{max} для ЭПП аргона находится ближе к выводному окну, чем для ЭПП воздуха, что объясняется более высокой плотностью аргона.

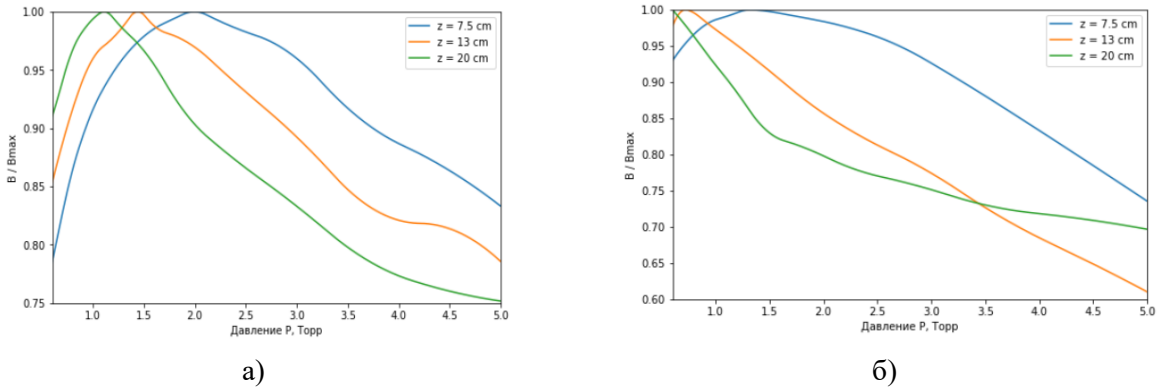


Рис. 4. B/B_{max} в разных сечениях трубки заполненной ЭПП при изменении давления: а) воздух; б) аргон

Рисунок 4 иллюстрирует влияние давления и состава плазмообразующего газа на профили B/B_{max} . Видно, что функция $B(P_m)$ для каждого сечения трубки также имеет максимум в некотором давлении P_m^* . Заметим, что на рисунке 4б при $z = 20$ см максимум не виден, потому что в этом сечении свечение ЭПП не наблюдается (см. рисунок 2б): ЭП полностью поглощается до этого сечения.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в проведенных экспериментах выявлены закономерности, характеризующие влияние давления плазмообразующего газа на профили интегральной интенсивности свечения ЭПП вдоль оси трубки:

- При любом давлении P_m профиль интенсивности излучения $B(z)$ имеет максимум B_{max} на некотором расстоянии от точки инъекции ЭП z , причем это расстояние уменьшается с ростом плотности плазмообразующего газа. При увеличении P_m этот максимум сдвигается в направлении к выводному устройству, т.е. в сторону меньших z , а уменьшение давления приводит к сдвигу максимума функции $B(z)$ в противоположном направлении, т.е. к дальнему от выводного устройства концу трубки.
- При увеличении расстояния z между выводным устройством и сечением, в котором проводится измерение интенсивности излучения плазмы, максимальное значение функции $B(P_m)$ уменьшается, причем это максимальное значение достигается при меньшем P_m . Уменьшение давления газа приводит к сдвигу максимума функции $B(P_m)$ в противоположном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

4. M. Vasiliev, T. Vasilieva. Materials production with Beam Plasmas // In Encyclopedia of Plasma Technology (Ed. J.L. Shohet, Taylor, Francis). 2017. P. 152–166.
5. Васильев М.Н. Применение электронно-пучковой плазмы в плазмохимии / Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Под ред. В.Е. Фортова. Т. XI. М.: Наука, 2001. С. 436-445.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чинь Ван Дык – студент Московского физико-технического института, г. Долгопрудный, Московская обл. e-mail: ducphuc0311@gmail.com

Михаил Николаевич Васильев – ведущий научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН доктор технических, профессор (ORCID: 0000-0002-7586-5573), г. Москва. e-mail: mvasiliev2006@rambler.ru