

УДК 533.9.072

Хлаинг Тун Йе, Чжо У Аунг, М. Н. Васильев

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Генерация электронно-пучковой плазмы внутри диэлектрического контейнера

Экспериментально исследована генерация плазмы внутри цилиндрического диэлектрического контейнера, заполненного газом, при инжекции тонкого непрерывного электронного пучка вдоль оси контейнера (ось z). В качестве контейнера использовались трубки из кварцевого стекла, воздух был плазмообразующей средой. Образование плазмы изучалось в широком диапазоне давления газа $P_m = 10^{-1} - 2 \cdot 10^1$ Торр. Исследовались продольные распределения интенсивности свечения $B(z)$ стенки контейнера и ее температуры $T_w(z)$. Было установлено, что обе эти функции имеют максимумы, положение которых зависит от величины P_m , однако максимумы $B(z)$ и $T_w(z)$ могут находиться на разных расстояниях z .

Ключевые слова: электронно-пучковая плазма, взаимодействие плазмы внутри диэлектрического контейнера.

Ye Hlaing Tun, Aung Kyaw Oo, M. N. Vasiliev

Moscow Institute of Physics and Technology

Generation of electron beam plasma inside a dielectric container

Plasma generation inside a cylindrical dielectric container filled with a gas by injecting a thin continuous electron beam along the container axis (z -axis) is experimentally investigated. Quartz glass tubes are used as the container, air is the plasma-generating medium. The plasma excitation is studied within wide range of gas pressure $P_m = 10^{-1} - 2 \cdot 10^1$ Torr. Longitudinal distributions of the luminescence intensity $B(z)$ of the container wall and its temperature $T_w(z)$ are studied. It was found that both of these functions have maxima whose positions depend on P_m , but the maxima $B(z)$ and $T_w(z)$ can be at different distances z .

Key words: electron beam plasma, plasma interaction inside the dielectric container.

1. Введение

Необходимость в исследовании генерации электронно-пучковой плазмы (т.е. плазмы, возбуждаемой при инжекции электронного пучка в плотную газообразную среду) внутри контейнера возникает при разработке плазмохимических реакторов, предназначенных для модификации материалов, плазмохимического синтеза и управляемой деструкции сложных органических и биоорганических соединений. Как показано в [1], свойства пучковой плазмы, находящейся внутри контейнера, существенно отличаются от плазмы, генерируемой в свободном пространстве. Свойства материала контейнера также существенно влияют на процессы генерации плазмы и, как следствие, на ее характеристики. И наоборот, при контакте плазмы с твердой стенкой могут происходить самые разнообразные процессы в поверхностном слое материала, а сам контейнер может накапливать электростатический

заряд. Очевидно, что процессы и в плазменном объеме, и на стенке контейнера зависят от электрофизических свойств материала контейнера. При этом оказывается важным, является ли контейнер проводящим или диэлектрическим.

Теоретическое описание и компьютерное моделирование генерации электронно-пучковой плазмы (ЭПП) в объеме, ограниченном твердыми поверхностями, и ее взаимодействие со стенкой контейнера требуют самосогласованного учета многочисленных электронно-кинетических, молекулярно-кинетических, плазмохимических, тепловых, газодинамических и электрофизических процессов. Каждая из этих задач, даже решаемая отдельно, является весьма сложной. Поэтому при исследовании упомянутых выше процессов наиболее информативными оказываются экспериментальные методы.

2. Цели и задачи исследования

Целью настоящего исследования является накопление экспериментальных данных об особенностях генерации ЭПП внутри диэлектрического контейнера в условиях, когда диэлектрические свойства материала могут играть существенную роль. Поскольку зарядка диэлектриков в ЭПП изучена достаточно детально [2], в настоящей работе мы изучали оптическое излучение плазмы, генерируемой в прозрачном цилиндрическом контейнере, стенки которого могут люминесцировать при контакте с плазмой. Теплообмен между плазмой и контейнером, а также бомбардировка стенки контейнера быстрыми электронами пучка вызывают нагрев контейнера.

В ходе исследования решались следующие задачи:

- изучалось продольное распределение интегральной интенсивности свечения $B(z)$ стенки контейнера при различных давлениях плазмообразующего газа P_m ;
- изучалось продольное распределение температуры стенки контейнера $T_w(z)$ при различных P_m ;
- сравнивались функции $B(z)$ и $T_w(z)$.

3. Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

В ходе наших экспериментов измерялись значения функций $B(z)$ и $T_w(z)$ в нескольких поперечных сечениях отрезка кварцевой трубки, внутри которой генерировалась ЭПП. Рис. 1 иллюстрирует постановку экспериментов. Тонкий электронный пучок (ЭП) 3, предварительно сформированный в высоковакуумной камере 2 электронной пушкой 1, инжектируется в заполненную плазмообразующим газом рабочую камеру 5 через выводное устройство 4 (газодинамическое окно). Отрезок кварцевой трубки 7 размещается в рабочей камере так, чтобы ее ось совпадала с осью инъекции пучка, а плазменное облако 6 было локализовано внутри трубки. Это обеспечивалось надлежащим выбором расстояния z_0 между трубкой и выводным окном.

Свечение кварцевой трубки, заполненной ЭПП, фотографировалось цифровой камерой, а изображения обрабатывались с помощью специальной компьютерной программы, которая позволяла вычислять интегральную интенсивность излучения вдоль направления z . Примеры исходных изображений, полученных при различных давлениях плазмообразующего газа, представлены на рис. 2.

Профиль температуры $T_w(z)$ измерялся миниатюрными датчиками температуры (производства фирмы Honeywell), закрепленными на внешней стороне трубки вдоль ее образующей.

В условиях динамического вакуума давление плазмообразующего газа P_m варьировалось с помощью натекателя, управляемого контроллером PR-4000 (производство фирмы MKS), а производительность откачки газа из рабочей камеры оставалась неизменной.

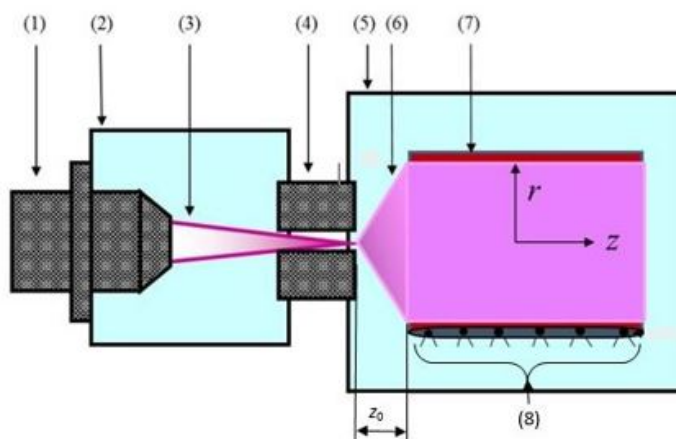


Рис. 1. Принципиальная схема генерации электронно-пучковой плазмы: (1) электронная пушка, (2) высоковакуумная камера, (3) электронный пучок, (4) выводное окно, (5) рабочая камера, (6) облако электронно-пучковой плазмы, (7) диэлектрический контейнер, (8) термосенсоры

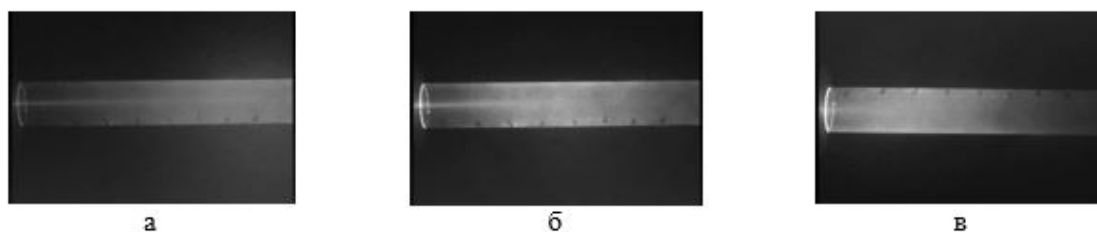


Рис. 2. Генерация электронно-пучковой плазмы воздуха в кварцевой трубе с внутренним диаметром 22 мм: а) $P_m = 0,5$ Торр, б) $P_m = 2,5$ Торр, в) $P_m = 10,0$ Торр

4. Результаты

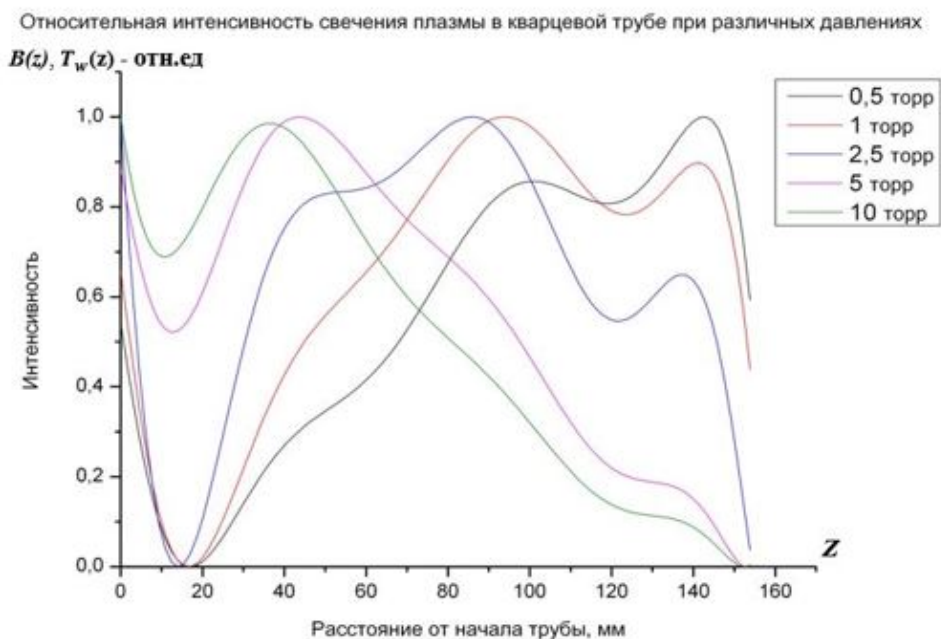


Рис. 3. Относительная интенсивность свечения плазмы в кварцевой трубе при различных давлениях

Основные результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 3, из которого следует, что при любом давлении P_m профиль интенсивности излучения $B(z)$ имеет максимум на некотором z . 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 трубы. Такая же закономерность имеет место и для функции $T_w(z)$: при высоких давлениях плазмообразующего газа сильнее нагрет ближний к выводному устройству конец трубы, а при низких давлениях – дальний конец. Важно отметить, что положения максимумов функций $B(z)$ и $T_w(z)$ не обязательно совпадают, что наглядно иллюстрирует рис. 4

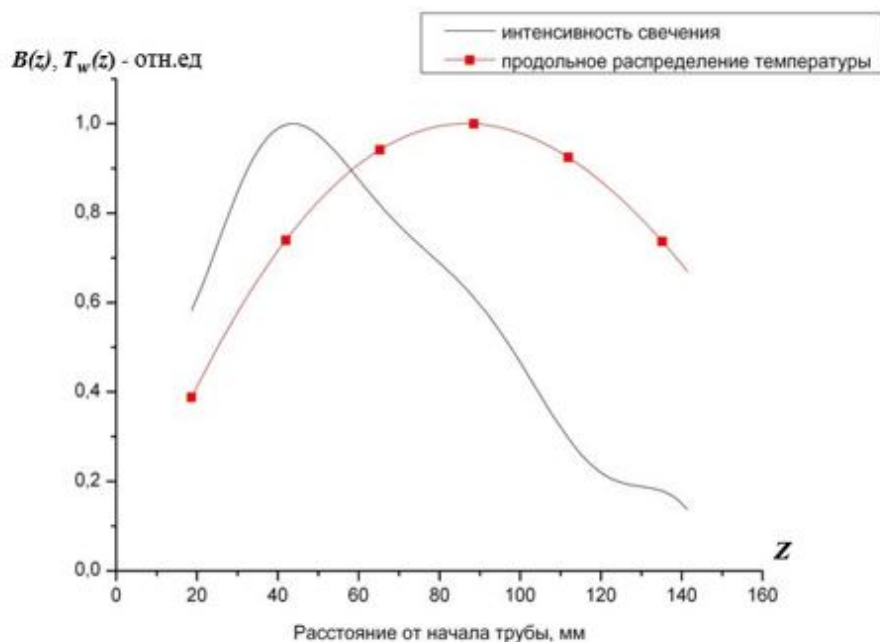


Рис. 4. Интенсивность свечения плазмы и температура стенки кварцевой трубы как функции расстояния между выводным окном и точкой измерения при давлении плазмообразующего газа (воздуха) $P_m = 10,0$ Торр

5. Выводы

На основании проведенных экспериментов выявлены основные закономерности, характеризующие влияние давления плазмообразующего газа на продольные профили интегральной интенсивности свечения и температуры стенки заполненного воздухом кварцевого цилиндрического контейнера при инъекции тонкого непрерывного электронного пучка вдоль его оси. Установлено, что эти профили имеют максимумы, которые смещаются в направлении от точки инъекции пучка по мере увеличения давления газа. При этом положения максимумов профилей температуры и интенсивности свечения не обязательно совпадают.

Литература

1. *Vasiliev M., Vasilieva T.* Materials production with Beam Plasmas // In Encyclopedia of Plasma Technology (Ed. J.L. Shohet, Taylor, Francis). 2017. P. 152–166.
2. *Юшков Ю.Г.* Форвакуумный импульсный плазменный источник электронов для модификации поверхности диэлектрических материалов: Дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Томск, 2012. 104 с.

References

1. *Vasiliev M., Vasilieva T.* Materials production with Beam Plasmas. In Encyclopedia of Plasma Technology (Ed. J.L. Shohet, Taylor, Francis). 2017. P. 152–166.
2. *Yushkov Yu. G.* Forvacuum pulsed plasma electron source for surface modification of dielectric materials: Diss. for the degree of Cand. Techn. of Sciences. Tomsk, 2012. 104 p.

Поступила в редакцию 13.12.2019