

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЫ ФОРВАКУУМНОГО ДАВЛЕНИЯ

Г.Б. Бузин, Т.М.Васильева

АННОТАЦИЯ

Проведены вычислительные эксперименты по моделированию электронно-пучковой плазмы в свободном объеме, внутри контейнера и вблизи поверхности твердых тел простейшей геометрии, с использованием программного обеспечения на основе метода Монте-Карло. Моделировались траектории движения электронов в среде форвакуумного давления: чистые газы, газовые смеси, аэрозоли. Рассчитывались пространственные распределения энерговыделения и температуры в различных зонах реакционного объема.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ПЛАЗМА, ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ РЕАКТОР ФОРВАКУУМНОГО ДАВЛЕНИЯ, МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

computer simulation of forevacuum pressure electron-beam plasma

G.B. Buzin, T.M. Vasilieva

ABSTRACT

Computational experiments were carried out to confirm the electron-beam plasma in the free volume, inside the container and near the surface, as well as using complex methods based on the Monte Carlo method. The trajectories of electron motion in the fore vacuum pressure medium were modeled: pure gases, gas mixtures, aerosols. The enveloping distributions of energy release and temperature were calculated in different impact zones.

KEYWORDS

ELECTRON-BEAM PLASMA, FOREVACUUM PRESSURE PLASMA-CHEMICAL REACTOR, MONTE CARLO METHOD, COMPUTATIONAL EXPERIMENTS

ВВЕДЕНИЕ

Электронно-пучковая плазма (ЭПП) является результатом взаимодействия пучка ускоренных электронов с газовой средой, поэтому ее описание включает в себя распространение и взаимодействие электронных пучков (ЭП) со средой, а также ионизационно-рекомбинационные, плазмохимические процессы в возбуждаемой таким способом плазме.

Принцип генерации и общие свойства ЭПП хорошо известны [1]. При прохождении через газ пучок рассеивается в упругих столкновениях, а энергия быстрых электронов постепенно расходуется в различных неупругих процессах взаимодействия со средой (ионизация, возбуждение атомов и молекул, диссоциация молекул и др). В результате, формируется плазменное облако, форма и размеры которого определяются параметрами первичного ЭП (начальной энергией электронов E_b и током пучка I_b), химическим составом и давлением плазмообразующего газа P_m .

Энергия, вложенная в газ при торможении быстрых электронов и релаксации первичного пучка, в конечном счете, переходит в тепло или высвечивается. В результате, в плазменном образовании газ может нагреваться, а само облако ЭПП или плазменный поток обычно представляют собой достаточно ярко светящиеся объекты.

Таким образом, ЭПП представляет собой сложный объект, интересный как для фундаментальных исследований, так и с точки зрения технических и технологических приложений. В последнем случае, обычно в плазменный объем помещаются образцы различных материалов или изделий, подлежащих пучково-плазменной обработке [2]. С целью экономии ресурсов физические эксперименты целесообразно дополнять компьютерным моделированием соответствующих процессов.

МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Вычислительные эксперименты проводятся с целью установления зависимости параметров, характеризующих условия химико-термического воздействия ЭПП на поверхность обрабатываемого образца, от параметров ЭП, плазмообразующего газа и от геометрии обрабатываемого образца. Для решения таких задач хорошо себя зарекомендовала методика компьютерного моделирования, разработанная С.Л. Лысенко [3], согласно которой самосогласованным образом рассматриваются следующие процессы:

- рассеяние быстрых электронов в газе и твердом теле;
- нагрев плазмообразующего газа за счет частичной диссипации энергии первичных электронов при их торможении в газе;
- отражение и поглощение электронов пучка поверхностью образца;
- нагрев образца бомбардировкой быстрыми электронами пучка и электронами промежуточных энергий, образующихся при генерации ЭПП;
- теплообмен теплопроводностью между образцом и окружающим газом;
- лучистый теплообмен между внешней поверхностью образца и стенками рабочей камеры;
- перетекание тепла в осевом и радиальном направлениях за счет теплопроводности плазмообразующего газа и материала обрабатываемого образца.

Распространение ЭП в плотных средах, как в газе, так и в материале образца, численно моделируются методом Монте-Карло в граничных условиях, определяемых постановкой задачи. В нашем конкретном случае область моделирования заполнена газом, снаружи ограничена цилиндром заданного радиуса, а внутри нее могут располагаться подобласти с существенно большей плотностью среды (плотность твердого тела), соответствующие обрабатываемому образцу.

Распространение ЭП в исследуемой области вызывает ее нагрев, при этом считается, что внешние границы этой области поддерживаются при температуре равной температуре окружающей среды. Как результат нагрева в такой области за счет теплопроводности и излучения твердых поверхностей формируется неоднородное распределение температуры в исследуемой области. Неоднородность поля температуры газа формирует некоторое пространственное распределение плотности этого газа. В этом случае электронному пучку приходится распространяться в газовой среде, неоднородность которой вызвана распространением этого же пучка. Таким образом, при моделировании распространения ЭП в плотной среде приходится решать самосогласованную задачу.

Для решения уравнения теплопроводности и накопления статистических данных при моделировании движения электронов используется равномерная расчетная сетка в цилиндрической системе координат, которая покрывает всю область моделирования. Размеры ячейки задавались исходя из требуемой точности решения уравнения теплопроводности. При моделировании шаг движения электрона по траектории задается в несколько раз меньше, чем размер расчетной сетки. Это способствует дополнительному повышению точности вычисления поглощенной мощности и, соответственно, точности решения уравнения теплопроводности.

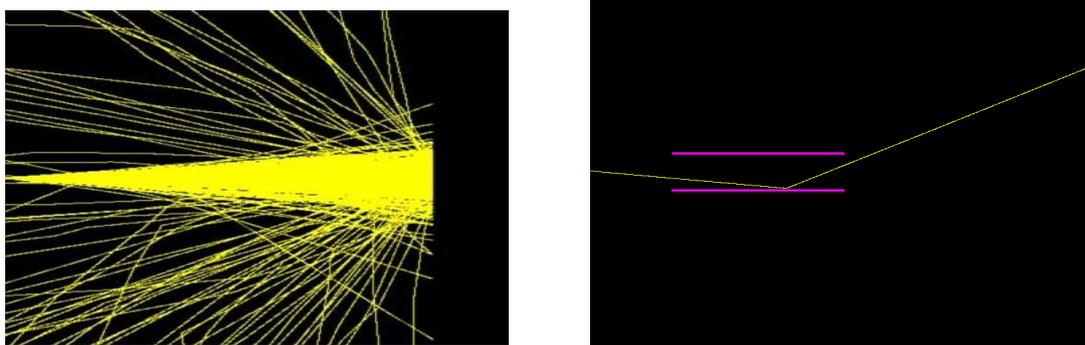
Электронные траектории начинают прослеживаться от точки инжекции электронного пучка в газовый объем - задается случайное направление движения электрона с углом отклонения от оси инжекции φ . Диапазон изменения среднеквадратичной величины - $\varphi_0 = 0-100$. Движение электрона прослеживается до границ области моделирования, либо до тех пор, пока энергия электрона не становилась меньше 150 эВ. В последнем случае предполагается, что оставшаяся у электрона энергия поглощается в той точке пространства, в которой она стала меньше 150 эВ [3].

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПП В ОБЪЕМЕ, ОГРАНИЧЕННОМ СТЕНКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНТЕЙНЕРА (ТРУБКИ)

Модель представляется следующим образом. Рабочая камера заполнена газом. С одного ее торца вдоль оси через двухступенчатое газодинамическое выводное окно [1,2] в нее вводится пучок ускоренных электронов (Рис. 1). В модели считается, что с электронами, попавшими в газовую среду, происходят следующие события:

- упругие столкновения с молекулами газа;
- столкновения, в результате которых молекулы возбуждаются;
- ионизационные столкновения, в результате которых происходит ионизация молекулы, и появляются вторичные электроны.

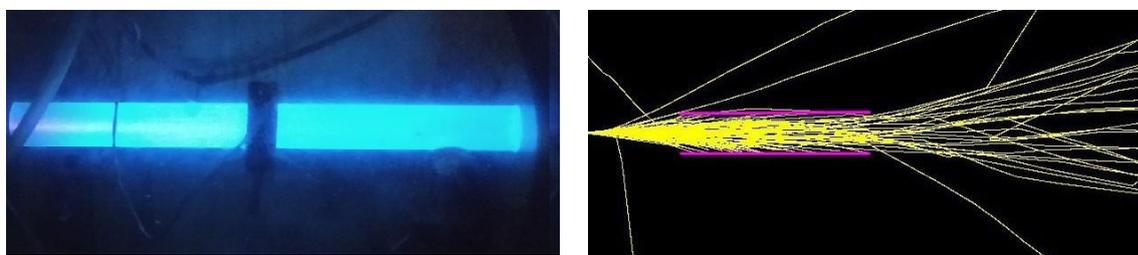
Те же процессы происходят при движении ускоренных электронов в объеме обрабатываемого твердого образца или в стенке контейнера (трубки), ограничивающей реакционный объем.



а

б

Рис. 1. Модель распространения электронно-пучковой плазмы в свободном объеме (а) и единичной траектории электрона в объеме, ограниченном трубкой (б).



а

б

Рис. 2. Генерация ЭПП воздуха в кварцевой трубке при $P_m = 1$ Торр (а) и результаты моделирования распространения ЭП при тех же условиях (б)

При моделировании ЭПП решается самосогласованная задача распространения пучка электронов, в которой учитывается процесс передачи тепла между газовой средой, заполняющей контейнер, и корпусом контейнера, а также между внешней стенкой контейнера и окружающим его газом. Таким способом, например, можно получить зависимость доли полной мощности ЭП, поглощенного слоем газа, и обрабатываемым образцом (Рис. 3).

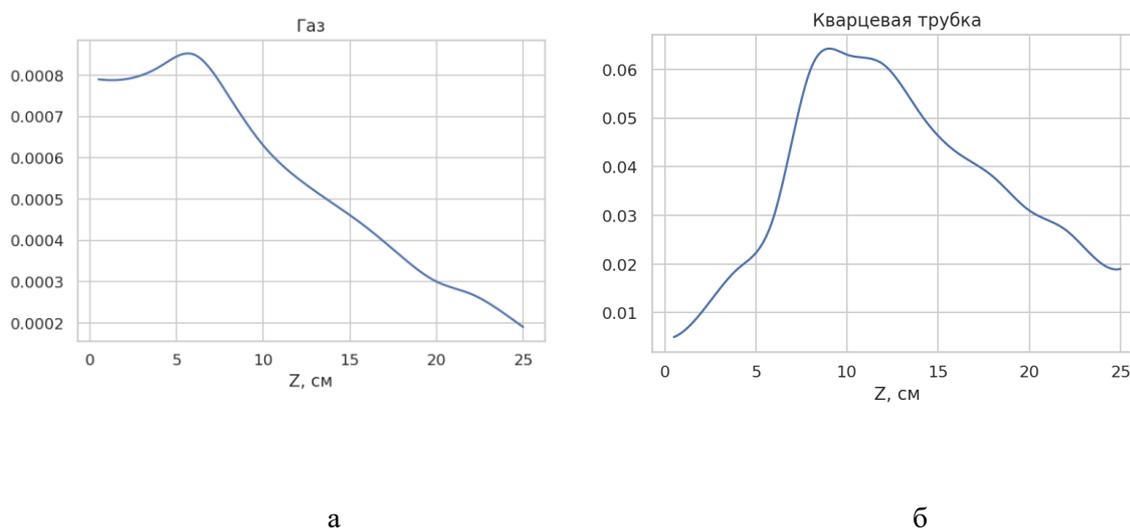


Рис. 3. Зависимость доли полной мощности электронного пучка, поглощенного слоем газа толщиной 1 см в зависимости от z (расстояние от выводного окна) (а) и поглощенно-го поверхностью кварцевой трубки (б). $P_m = 1$ Торр.

Видно, что максимум энерговыделения и в газе и в твердом теле находятся на некотором расстоянии от точки инъекции ЭП, причем профили энерговыделения по оси z для газа и твердого тела различны. Если первый вывод является прямым следствием общих физических закономерностей распространения электронных пучков в плотных средах [4], то второй эффект объясняется взаимовлиянием электронно-кинетических процессов в плазменном объеме и теплообменных процессов в твердом теле и газе.

Работа поддержана грантом РФФ № 21-79-30062

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность С.Л. Лысенко за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Vasiliev, Applications of Electron-Beam Plasmas in Plasmachemistry. Encyclopedia of Low-Temperature Plasma. Chief Editor V. Fortov. // Moscow, Nauka (2001)
2. M. Vasiliev, T. Vasilieva, Beam plasmas: materials production. In: Encyclopedia of Plasma Technology. Ed. by J. Leon Shohet // Taylor & Francis Inc., USA (2016)
3. Лысенко С.Л., Численное моделирование электронно-пучковой плазмы в объеме, ограниченном твердыми стенками, МФТИ (2004)
4. Аброян И.А., Андронов А.Н., Титов А.И., Физические основы электронной и ионной технологии. М.: Высшая школа (1984)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Г.Б. Бузин – студент Московского физико-технического института, г. Долгопрудный, Московской обл. e-mail: buzin.gb@phystech.edu;

Т.М.Васильева – доктор технических наук, доцент (ORCID: 0000-0001-6103-6195).
Объединенный институт высоких температур РАН, г. Долгопрудный, Московской обл.
e-mail: tmvasilieva@gmail.com