

## Моделирование нагрева цилиндрического контейнера, заполненного электронно-пучковой плазмой азота

*М.Х. Аунг, Ч.М. Аунг, В.Я. Ч. Хтэт*

Московский физико-технический институт (государственный университет)

### 1. Введение

Работа посвящена компьютерному моделированию сложных плазмотехнических систем, предназначенных для пучково-плазменной обработки изделий сложной геометрии. Рассматривалась задача расчёта пространственных полей температуры протяженной трубы, внутри которой находится электронно-пучковая плазма (ЭПП). ЭПП генерируется инъекцией концентрированного электронного пучка (ЭП) в плазмообразующий газ, заполняющий трубу. Задачи в такой постановке характерны, в частности, для расчета технологических процессов плазменно-стимулированного синтеза функциональных покрытий на внутренних поверхностях полых изделий [1].

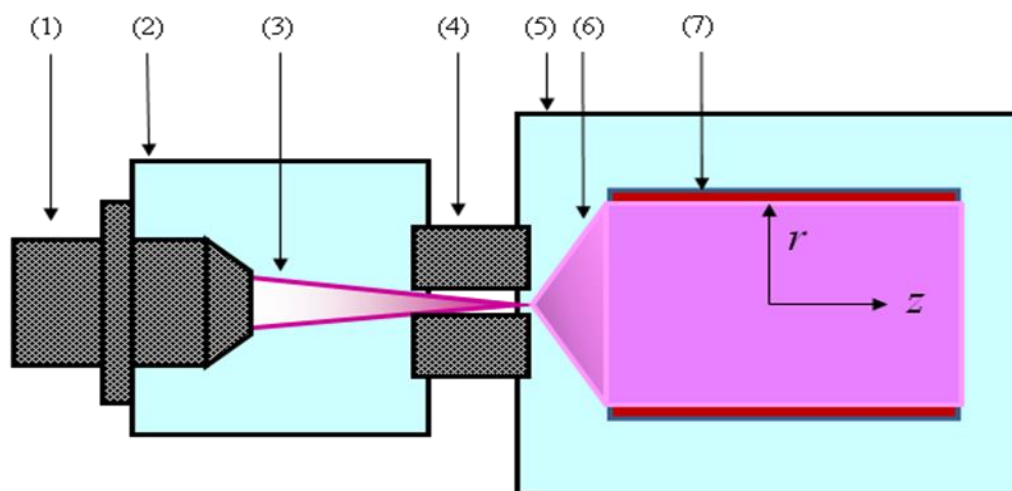


Рис.1. ЭП инжектируется внутри цилиндрического контейнера, заполненного газом:

1 - электронная пушка, 2 - высоковакуумная камера, 3 - электронный пучок, 4 - выводное окно, 5 – рабочая камера, 6 – облако электронно-пучковой плазмы азота, 7 – титановая труба

## 2. Постановка вычислительного эксперимента

Рассматривается нагрев цилиндрического контейнера заполненного азотом, вдоль оси которого (ось  $z$ ) инжектируется тонкий непрерывный ЭП, формируемый электронной пушкой, которая находится в высоковакуумной камере (рис. 1). Инжекция ЭП в плотный газ осуществляется с помощью выводного окна.

При взаимодействии ЭП с газом и стенками контейнера происходят различные электронно-кинетические, плазмохимические и тепловые процессы, которые приводят к

- возбуждению плазмы внутри контейнера;
- нагреву газа и стенок контейнера.

К наиболее значимым относятся следующие процессы:

- рассеяние (упругое и неупругое), торможение и поглощение быстрых электронов в газе и твёрдом теле;
- отражение электронов от стенок контейнера (упругое, неупругое);
- плазмохимические реакции в ЭПП;
- нагрев плазмообразующего газа за счёт частичной диссипации энергии первичных электронов при их торможении в газе;
- нагрев контейнера из-за бомбардировки его внутренней стенки быстрыми электронами пучка и электронами промежуточных энергий, образующихся при генерации ЭПП;
- теплообмен теплопроводностью между внутренней стенкой контейнера и заполняющей его плазмой;
- теплообмен теплопроводностью между наружной стенкой контейнера и окружающим его газом;
- лучистая теплоотдача нагретой наружной стенки контейнера;
- перенос тепла вдоль трубы за счет теплопроводности материала.

Перечисленные процессы рассматривались самосогласованным образом, а моделирование распространения электронного пучка в плотных средах, как в газе, так и в материале контейнера выполнялось методом Монте-Карло. Расчеты проводились с целью нахождения продольных профилей температуры стенки контейнера  $T_w(z)$  для различных

условий генерации ЭПП и изучения влияния теплофизических свойств материала контейнера на  $T_w(z)$ .

### 3. Результаты вычислительных экспериментов

Расчеты проводились для давлений плазмообразующего газа (азота)  $P_g = 1, 10$  и  $30$  Торр. Начальная энергия электронов принималась равной  $30$  кэВ, а ток пучка варьировался в диапазоне  $1-10$  мА. Рассматривались контейнеры, изготовленные из материалов с сильно различающимися коэффициентами теплопроводности: алюминиевый сплав Д16 и нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Проведенные расчеты позволили выявить некоторые важные закономерности нагрева стенки контейнера, а именно:

1. При достаточно длительной инжекции ЭП ( $\tau \rightarrow \infty$ ,  $\tau$  - продолжительность инжекции) на цилиндрической поверхности контейнера устанавливается стационарное распределение температуры  $T_w(z)$ ; это распределение имеет максимум в некотором сечении  $z_m$ ,
2. Положение максимума  $z_m$  зависит от давления газа: чем выше  $P_g$ , тем ближе к выводному окну находится этот максимум.
3. Изменение силы тока ЭП незначительно влияет на положение максимума  $z_m$ , однако значение температуры в этом максимуме  $T_w(z_0)$  существенно, однако нелинейно, возрастает с увеличением  $I_b$ .
4. Чем выше теплопроводность материала контейнера, тем более пологим является профиль  $T_w(z)$  и тем ниже значение температуры  $T_w(z_0)$  в этом максимуме.

### Литература

1. M.N. Vasiliev, T.M. Vasilieva, S.L. Lysenko, Aung Tun Win. Electron Beam Plasma Generation in a Cylindrical Container // VII Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology (PPPT-7). Minsk, Belarus, September 17-21, 2012. Contributed papers V.2. P. 678-681