

УДК:539.141;537.868

**ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ПЛАЗМА В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ:
ГЕНЕРАЦИЯ, СВОЙСТВА, ПРИЛОЖЕНИЯ****М.Н. Васильев, В.А. Мясников, Аунг Тун Вин**

Московский физико-технический институт (государственный университет),
Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, Россия
E-mail: mvasiliev2006@rambler.ru, E-mail: csl@mail.mipt.ru

Аннотация

Рассматривается образование электронно-пучковой плазмы (ЭПП) с помощью электронно-лучевой (ЭЛ) инъекции в контейнере с заполненным плазмогенерированным газом. Изучены результаты взаимодействия ЭПП со стенкой контейнера. Процессы взаимодействия оказывают влияние и на свойства плазмы и на поведения контейнера (отопление, люминесценции, электрический заряд и некоторые другие). Также изучено плазмохимическая модификация материала контейнера вызванная ЭПП и ЭЛ. Приведены описания и примеры их применение плазменной установки для промышленных и аэрокосмических технологий.

Ключевые слова: газофазные и гетерофазные плазмохимические реакции, профили свечения плазмы, генерация, спектр излучения, электронно-пучковая плазма

Введение**Физическая модель генерации ЭПП в пространстве, ограниченном стенками контейнера**

Электронно-пучковая плазма (ЭПП) образуется при инъекции электронного пучка (ЭП) в плотную среду, в качестве которой могут использоваться различные газы и их смеси, пары неорганических и органических веществ, газы и пары с мелкодисперсными добавками в твердой и жидкой фазах. Техника генерации ЭПП в неограниченном пространстве достаточно хорошо отработана, а для ряда практически важных плазмообразующих сред изучены и свойства свободно-локализованных пучково-плазменных образований [1].

Однако, опыт разработки устройств, в которых используется ЭПП, показывает, что в реальных конструкциях плазмохимических реакторов или энергоустановок летательных аппаратов плазма генерируется внутри замкнутого объема и контактирует со стенками контейнера.

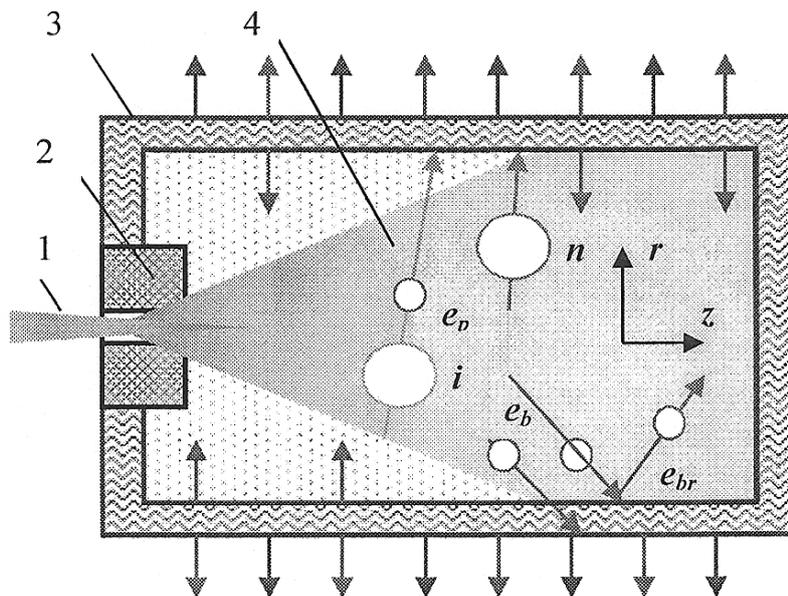
Это взаимодействие значительно усложняет описание процессов, протекающих в плазменном объеме, и существенным образом влияет не только на свойства ЭПП, но и на функционирование всей плазмотехнической системы.

Для анализа большинства разработанных нами плазмотехнических систем характерна следующая постановка физической задачи.

Тонкий непрерывный ЭП (1) с помощью выводного окна (2) инжектируется в заполненный плазмообразующим газом цилиндрический контейнер (3) вдоль его оси, z , (см. рис.1). При распространении в газе пучок первичных электронов (e_b) рассеивается в упругих и неупругих столкновениях; при этом формируется облако ЭПП (4), которое контактирует со стенками контейнера.

В генерации плазмы участвуют также электроны, отраженные от стенок (e_{br}), а поглощение электронов материалом контейнера приводит к нагреву последнего и, при достаточно низких давлениях плазмообразующего газа, P_m , – к его электростатической зарядке.

При достаточно продолжительной инъекции ЭП в контейнере устанавливается стационарный тепловой режим, который характеризуется некоторыми продольными температурами газа ($T_g(z)$) и цилиндрической стенки контейнера ($T_w(z)$). Профили и абсолютные значения этих температур определяются балансом мощности инжектируемого пучка и теплоотвода от контейнера в окружающую его среду. Теплообмен между стенкой контейнера и заполняющей его плазмой, а также тепловые потоки вдоль стенки контейнера, обусловленные теплопроводностью материала, тоже влияют на $T_g(z)$ и $T_w(z)$.



1 – ЭП, 2 – выводное окно, 3 – контейнер, 4 – облако ЭПП

Рис. 1. Генерация ЭПП внутри цилиндрического контейнера.

Частицы, образующиеся в ЭПП, двигаются в плазменном облаке за счет диффузии, причем движение ионов (i) и вторичных электронов (e_p) определяется амбиполярной диффузией, а движение нейтральных частиц (n) – обычной диффузией. В газовом объеме и на стенке контейнера происходят различные молекулярные превращения с участием ионов и нейтральных частиц в основном и возбужденном состояниях. В газофазных и гетерофазных плазмохимических реакциях образуются разнообразные продукты, при этом на внутренней поверхности контейнера могут синтезироваться химические соединения, состав и структура которых определяются родом плазмообразующего газа, условиями генерации ЭПП, в том числе – температурным режимом, и продолжительностью работы устройства.

И в газовом объеме, и на стенке контейнера также происходят процессы рождения и ги-

бели заряженных частиц. По достижении стационарного режима в контейнере устанавливается некоторое пространственное распределение концентрации электронов $N_{ep}(z,r)$; значения N_{ep} в каждой точке реакционного объема определяется скоростями рождения и гибели электрон-ионных пар в элементарном объеме плазмы и диффузионным выносом заряженных частиц из этого объема.

Если контейнер изготовлен из материалов, люминесцирующих под действием потока электронов (например, кварца, некоторых оксидов и др.), то наблюдается свечение стенки контейнера. На рисунке 2 представлена фотография кварцевой трубы с внутренним диаметром 25 мм, внутри которой генерируется ЭПП воздуха, а на рисунке 3 – спектр излучения такого контейнера.

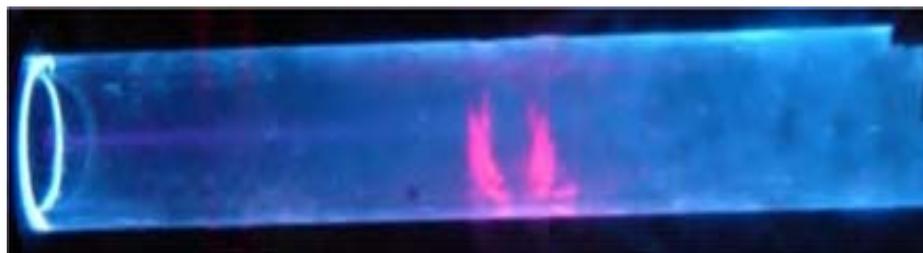


Рис. 2. Генерация ЭПП в кварцевой трубе; $P_m = 5$ Торр.

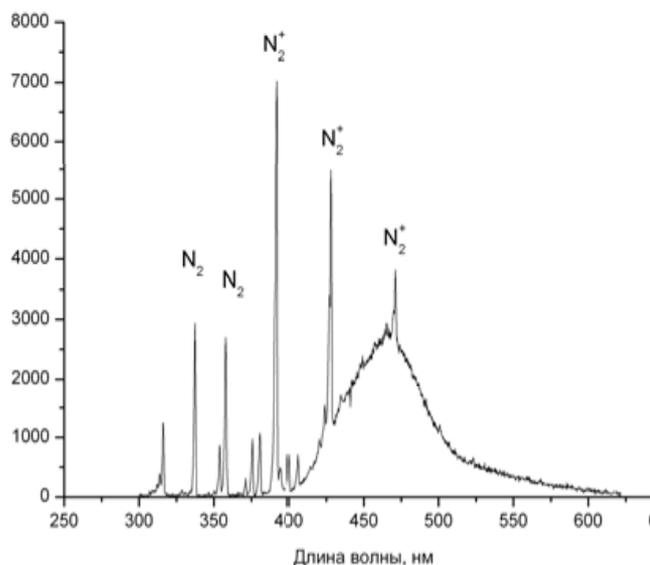


Рис. 3. Спектр излучения кварцевого контейнера, внутри которого генерируется ЭПП воздуха.

Результаты и их обсуждение

Эксперименты, иллюстрируемые рисунками 2 и 3, равно как и другие эксперименты, результаты которых обсуждаются ниже, проводились следующим образом. Цилиндрический контейнер в виде отрезка трубы с открытыми торцами устанавливался в заполненной плазмообразующим газом рабочей камере пучково-плазменной установки. ЭП инжектировался вдоль оси трубы. Температура стенки трубы на различных расстояниях z измерялась оптическим пирометром Opttris LS. Оптическое излучение из контейнера в УФ-, видимом и ИК-диапазонах регистрировалось спектрометрами AvaSpec-2048-2 и AvaSpec-NIR256-1.7. Осредненные по координате r значения концентрации электронов $N_{ep}(z)$ в нескольких поперечных сечениях трубы измерялись методом активного многомодового СВЧ-зондирования с помощью открытого бочкообразного резонатора [2]. Свойства поверхности металлического контейнера до и после контакта его стенок с ЭПП исследовались по методикам, подробно описанным в [3].

Специальные серии экспериментов проводились в условиях продувки газа (или смеси газов) вдоль трубы. Рисунок 4 иллюстрирует постановку такого эксперимента. Металлическая (титановая) труба 2 помещалась в рабочую камеру установки (на рисунке не показана); после этого камера откачивалась до давления $\sim 10^{-2}$ Торр. С помощью соплового

устройства в трубу подавалась смесь азота с газообразными углеводородами.

При инжекции ЭП вдоль трубы в последней формировался поток ЭПП 5. Как результат воздействия плазмы, на внутренней поверхности трубы синтезировался слой 3 карбонитрида титана (см. рис. 5); процесс синтеза сопровождался нагревом трубы. Чтобы существенно повысить температуру стенки трубы T_w без дополнительных затрат мощности ЭП, труба помещалась в теплозащитный кожух 1. В стенке кожуха имелись специальные окна 6, через которые оптическими или контактными методами измерялись значения температуры в различных точках, $T_w(z)$.

На рисунке 6 представлены продольные профили температуры $T_w(z)$ стенки контейнера – отрезка кварцевой трубы внутренним диаметром 22 мм, нормированные на максимальное значение температуры $(T_w)_{max}$ на данном отрезке трубы.

Плазмообразующая среда – неподвижный воздух при давлении $P_m = 10$ Торр или воздушный поток со статическим давлением 10 Торр. Для тех же условий генерации ЭПП на рисунке 5 приведены продольные профили интенсивности свечения плазмы, $B(z)$, нормированные на максимальное значение B_{max} .

Как видно из рисунка, максимумы интенсивности свечения и температуры стенки контейнера находятся приблизительно в одном и том же сечении трубы, т.е. продувка газа не оказывает влияния на положение максимумов,

однако абсолютные значения температуры отличаются существенно: $(T_w)_{max} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ для

неподвижного газа и $(T_w)_{max} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ для воздушного потока (скорость потока $\approx 150 \text{ м/с}$).

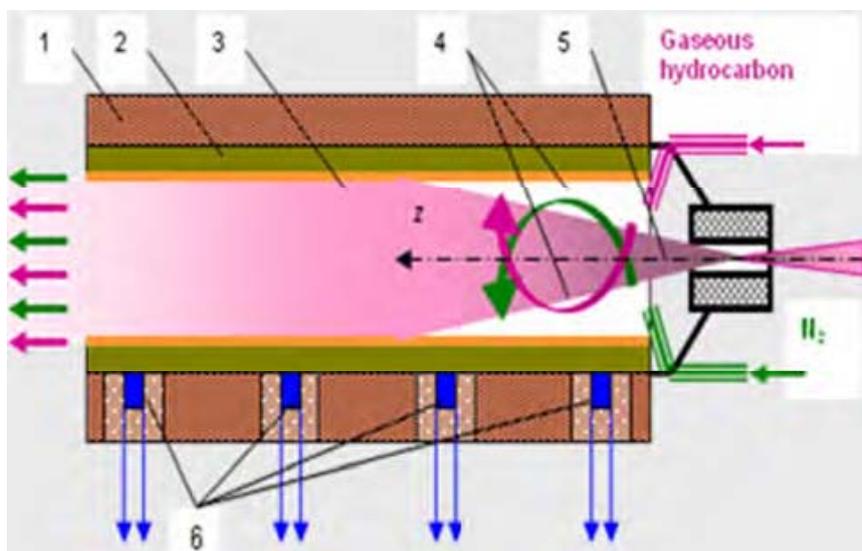


Рис. 4. Генерация потока ЭПП смеси газов в трубе.

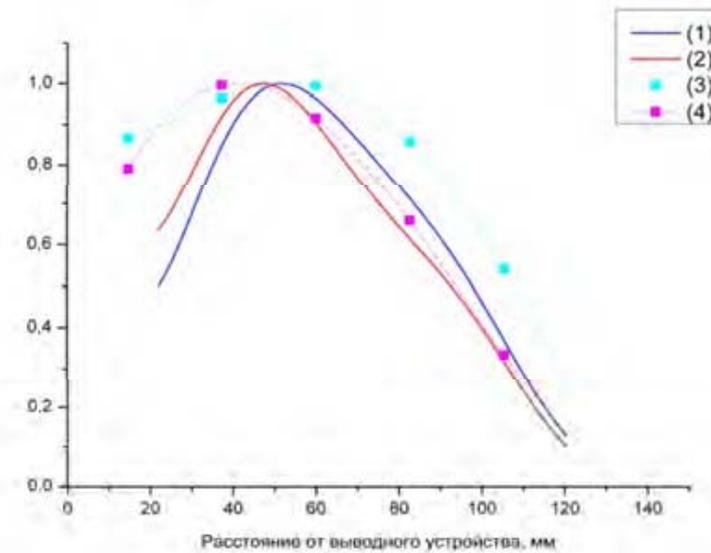


Рис. 5. Компонентный состав слоя, синтезированного на внутренней поверхности трубы из титанового сплава BT1-00 в ЭПП смеси азота и метана.

Продувка газа не влияет и на спектр излучения, эмитируемого контейнером и заключенной внутри него плазмы (см. рис. 3). Этот спектр представляет собой суперпозицию двух спектров, а именно – непрерывного спектра люминесценции кварца и линейчатого спектра излучения ЭПП. Сравнение спектров, снятых при давлениях 1 и 5 Торр на расстоянии 5, 10, 15 см от выводного устройства, показало, что на расстоянии $z = 10 \text{ см}$ высота «горба» спек-

тра люминесценции оказалась больше, чем на расстоянии $z = 5 \text{ см}$, а пики линейчатого спектра излучения плазмы, напротив, оказались ниже.

Эти факты можно объяснить следующим образом. Интенсивность люминесценции кварца приблизительно пропорциональна плотности потока быстрых электронов, падающих на внутреннюю поверхность трубы.



кривые 1 и 3 – продувка газа; кривые 2 и 4 – неподвижный газ

Рис. 6. Продольные профили интенсивности свечения плазмы, $B(z)/B_{max}$ (кривые 1 и 2), и температуры стенки трубы, $T_w(z)/(T_w)_{max}$ (кривые 3 и 4).

На меньших расстояниях от выводного окна ($z = 5$ см), где пучок еще не успел полностью рассеяться, стенка контейнера бомбардируется лишь незначительным количеством электронов. Однако, в этой зоне вблизи оси контейнера плотность энерговклада пучка в газ наиболее велика. Действительно, число актов возбуждения Q , производимых в единицу времени в единице объема пучком с плотностью тока j_b :

$$Q_{ex} \cong \frac{j_b}{U_{ex}} L(E), \tag{1}$$

где $L(E)$ – эффективное торможение электрона, E – энергия электрона, U_{ex} – характерная энергия возбуждения молекулы плазмообразующего газа.

Полагая, что функция $L(E)$ примерно одинакова для $z = 5$ и 10 см, интенсивность возбуждения газа, а, следовательно, и высота пиков линейчатого спектра, будет тем больше, чем выше плотность тока j_b , т.е. на меньших z . Однако, по мере увеличения z , плотность потока быстрых электронов, бомбардирующих стенку трубы, возрастает, что интенсифицирует люминесценцию. На еще больших расстояниях и плотность энерговыведения ЭП, и плотность потока электронов, бомбардирующих стенку контейнера, падают. В результате, обе составляющие рассматриваемого спектра

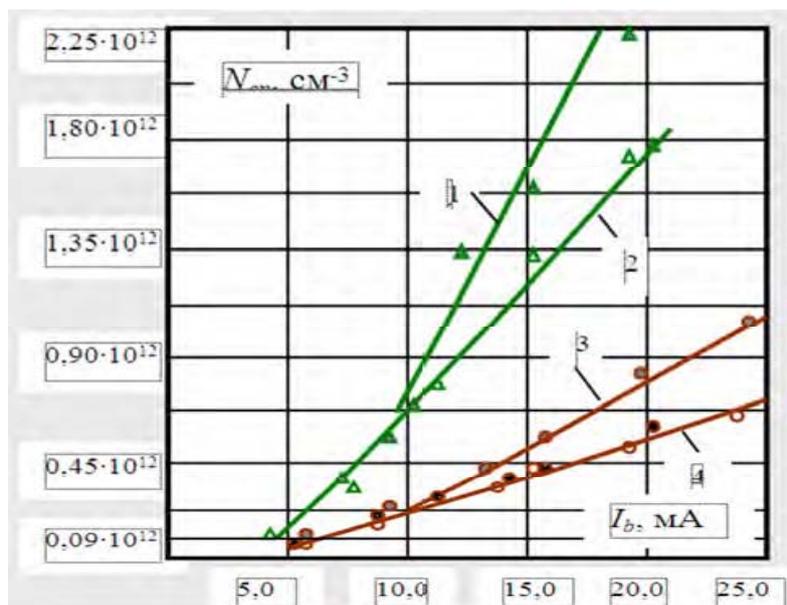
излучения ослабевают, что, в частности приводит к быстрому спаду кривых 1 и 2, изображенных на рисунке 6, на далеких расстояниях z .

На рисунке 7 представлены результаты измерения средних значений концентрации электронов, N_{ep} , в различных поперечных сечениях кварцевой трубы с внутренним диаметром 22 мм. Измерения проводились при двух значениях давления плазмообразующего газа (аргона): $P_m = 8$ и 12 Торр; результаты изображены в виде зависимости N_{ep} от интегрального тока, инжектируемого ЭП, I_b , при постоянной начальной энергии электронов пучка 29 кэВ.

Рисунок 7 показывает, что в выбранном поперечном сечении контейнера увеличение тока пучка приводит к возрастанию N_{ep} , что вполне естественно, поскольку количество электрон-ионных пар, Q_i , рождающихся в единичном объеме ЭПП в единицу времени, может быть вычислено из соотношения, аналогичного (1):

$$Q_i \cong \frac{j_b}{U_i} L(E), \tag{2}$$

где e – заряд электрона, U_i – энергетическая цена рождения электрон-ионной пары.



1, 2– $z = 90$ мм, $P_m = 12$ Торр; 3, 4– $z = 165$ мм, $P_m = 8$ Торр

Рис. 7. Плотность электронов в ЭПП аргона, генерируемой в кварцевой трубе, как функция тока ЭП.

Однако, обращает на себя внимание неоднозначность зависимостей $N_{ep}(I_b)$, возникающая при достаточно больших токах пучка. Расхождение кривых 1 и 2, равно как и кривых 3 и 4, при $I_b > 10$ мА объясняется тем, что экспериментальные точки, по которым строились исследуемые зависимости $N_{ep}(I_b)$, были получены при различных температурах газа, заполняющего контейнер: кривые 1 и 3, лежащие выше, соответствуют температуре газа $T_g = 900$ К, а кривые 2 и 4, лежащие ниже – температуре газа $T_g = 300$ К. Эти факты согласуются с результатами работы [2], где показано, что концентрация электронов в аргоне повышается по мере роста температуры газа и может достичь критических значений, при которых возможно зажигание пучково-плазменного

разряда. В наших экспериментах зажигание пучково-плазменного разряда наблюдалась при токах ЭП $I_b > 50$ мА, когда температура стенки контейнера достигала 1000 К.

Литература

1. Васильев М.Н. // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Под ред. В.Е. Фортова, 2001. Т. XI. С. 436.
2. Александров Н.Л., Васильев М.Н., Лысенко С.Л., Махир А.Х. // Физика плазмы, 2005. Т. 31, № 5, С. 466.
3. Васильева Т.М., Лысенко С.Л., Кукарко В.А. // Физика и химия обработки материалов, 2010. №5. С. 29-36.

**ELECTRON-BEAM PLASMA IN CLOSED VOLUME:
GENERATION, PROPERTIES, APPLICATIONS****M.N. Vasiliev, V.A. Myasnikov, Aung Tun Win**

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)
Institutskiy lane, 9, Dolgoprudny, Russia
E-mail: mvasiliev2006@rambler.ru E-mail: csl@mail.mipt.ru

Abstract

Generation of the Electron-Beam Plasma (EBP) by means of the Electron Beam (EB) injection into a container filling with a plasmagenerating gas is considered. The interaction of the EBP with the container walls is studied. The interaction processes are found to be responsible for both plasma properties and container behavior (heating, luminescence, electric charging and some others). Plasmachemical modification of the container material caused by the EBP and EB is studied as well. Plasma setups in which the EB is injected in still and flowing gas are described and examples of their applications for industrial and aerospace technologies are given.

Keywords: gas-phase and heterophase plasma chemical reaction profiles of plasma glow, the generation, emission spectrum, electron-beam plasma

**ЖАБЫҚ КӨЛЕМДЕГІ ЭЛЕКТРОНДЫ-ШОҚТЫ ПЛАЗМА:
ГЕНЕРАЦИЯ, ҚАСИЕТ, ҚОСЫМША****М.Н. Васильев, В.А. Мясников, Аунг Тун Вин**

Физика және технологиялар Мәскеу институты (мемлекеттік университеті)

Институтская көшесі, 9, Долгопрудный к., Россия
E-mail: mvasiliev2006@rambler.ru E-mail: csl@mail.mipt.ru

Аннотация

Плазмагенерирленген газбен толтырылған контейнерге электронды-сәулелі (ЭС) инъекция көмегімен электронды-шоқты плазма (ЭШП) түзілу механизмі қарастырылуда. Контейнер қабырғасымен ЭШП әрекеттесу нәтижелері зерттелді. Әрекеттесу процесі контейнердің де және плазманың да қасиетіне әсерін тигізеді (жылыту, люминесценция, электрлік зарядталу және басқа да). Сонымен қатар ЭС және ЭШП-нің әсерінен туындалған контейнер материалының плазмахимиялық модификациясы зерттелінді. Аэроғарыш және өнеркәсіп үшін плазмалық құрылғыны қолдану мысалдары және сипаттамасы келтірілді.

Түйінді сөздер: газ фазалық және heterophase плазмалық химиялық реакция плазмалық свечения профильдер, ұрпақ, эмиссиялық спектрін, электронды-сәулелік плазма