

ГЕНЕРАЦИЯ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ И ЖИДКОСТИ

GENERATION AND PROPERTIES OF ELECTRON-BEAM PLASMA NEAR THE SURFACE OF SOLIDS AND LIQUIDS

Йе Хлаинг Тун/ yehlaingtun@phystech.edu (ORCID: 0000-0002-3559-9717)

Аунг Чжо У / aungkyaw@phystech.edu (ORCID: 0000-0003-4799-3284)

М.Н.Васильев / vasiliev.mn@mipt.ru

Хтет Ко КоЗай / htetkokozaw536@gmail.com (ORCID: 0000-0002-8552-4633)

Т.М.Васильева / tmvasilieva@gmail.com (ORCID: 0000-0001-6103-6195)

Ye Hlaing Htu¹(ORCID: 0000-0002-3559-9717)

Aung Kyaw Oo (ORCID: 0000-0003-4799-3284)

M.N.Vasiliev / vasiliev.mn@mipt.ru

Htet Ko KoZaw (ORCID: 0000-0002-8552-4633)

T.M.Vasilieva (ORCID: 0000-0001-6103-6195)

¹Московский физико-технический институт Московская обл., г. Долгопрудный.

Исследованы свойства электронно-пучковой плазмы, генерируемой при давлениях 1-20 Торр в неограниченном пространстве, а также вблизи поверхности твердого тела или жидкости.

The properties of electron-beam plasma are considered which are generated at pressures of 1-20 Torr in unlimited space, as well as near the surface of a solid or liquid, in a reaction volume.

Ключевые слова: электронно-пучковая плазма.

Keywords: electron-beam plasma.

ВВЕДЕНИЕ

Уже более двух десятилетий ведутся исследования, нацеленные на разработку плазмотехнических систем, в которых плазма возбуждается электронными пучками (электронно-пучковая плазма, ЭПП) при их взаимодействии с достаточно плотной газообразной средой. Рассматриваются применения таких систем в производственных, аэрокосмических технологиях, а также для решения медико-биологических и экологических задач. При этом эффективно используются уникальные свойства пучково-плазменных систем – возможность генерации больших объемов сильнонеравновесной химически активной плазмы практически любых газов. Обычным диапазоном рабочих давлений для таких систем являются давления форвакуумного диапазона (0,1-100 Торр), а температура газовой среды может варьироваться в весьма широком диапазоне в зависимости от мощности электронного пучка, используемого для генерации плазмы, и от особенностей решаемой технической задачи.

Другой важной особенностью пучково-плазменных систем является то обстоятельство, что в большинстве прикладных задач имеет место контакт электронно-пучковой плазмы с какой-либо поверхностью, например, с плоской поверхностью обрабатываемого изделия, частицами аэрозоля, если обработке подвергаются материалы в виде порошков, или со слоем жидкости.

Целью работы явилось исследование формирования ЭПП в газовых, парогазовых и двухфазных газожидкостных смесях применительно к конструированию и испытаниям проточных пучково-плазменных плазмохимических реакторов с реакционными камерами планарной и коаксиальной конфигураций.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая постановка задачи экспериментального исследования иллюстрируется рис. 1. Тонкий электронный пучок (ЭП), предварительно сформированный в высоковакуумной камере электронной пушки, инжектируется в заполненную плазмообразующим газом рабочую камеру через выводное устройство (газодинамическое окно). Из-за упругих и неупругих процессов, сопровождающих распространение ЭП в газе, пучок рассеивается и деградирует. В результате, формируется облако ЭПП, в которое может быть помещена плоская мишень, твердая или жидкая. Направление оси инжекции пучка образует угол φ с плоскостью мишени.

В ходе наших экспериментов измерялась температура металлической мишени T_w ; регистрировался спектр излучения приповерхностной плазмы на фоне непрерывных спектров люминесценции мишени и теплового излучения мишени. Варьировались давление плазмообразующего газа P_m (в диапазоне 1-20 Торр) и ток пучка I_b (от 1,0 до 100 мА). Эксперименты проводились для различных углов φ в следующих газах: воздух, кислород, инертные газы (гелий, аргон), газообразные углеводороды (метан, пропан).

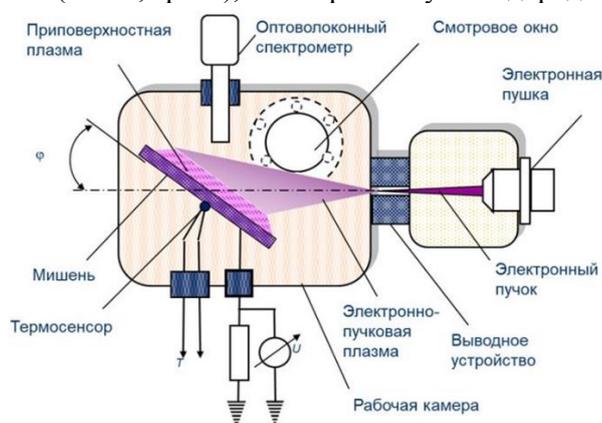


Рис.1. Схема экспериментов по генерации плазмы вблизи поверхности плоской мишени.

Принципиальные схемы систем измерения температуры стенки реакционной камеры представлены на рис. 2. Рис. 2а иллюстрирует методику неконтактного измерения температуры T_w с помощью ИК-пирометра через окно из селенида цинка (ZnSe). Такая схема наиболее подходит для реакционных камер коаксиальной конфигурации без теплоизоляции внешней поверхности. Для теплоизолированных камер в силу очевидных причин более удобными являются контактные измерения: миниатюрные термодатчики могут быть установлены в различных точках реакционной камеры, как показано на рис. 2б.

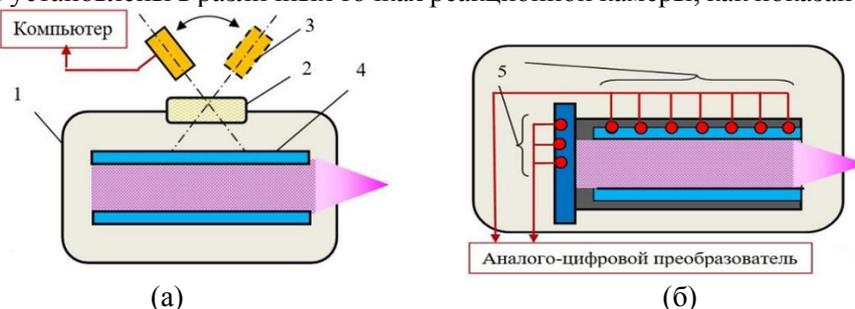


Рис.2. Схема измерения температуры стенок реакционной камеры; (а) - пирометрия, (б) - контактными термодатчиками. 1 - рабочая камера, 2 - окно ZnSe, 3 - пирометр, 4 - реакционная камера, 5 – термодатчика.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Таблица 3 иллюстрирует влияние продувки плазмообразующего газа на продольное распределение температуры в цилиндрической реакционной камере (коаксиальная конфигурация). Видно, что в газовом потоке температура стенки камеры нагревается слабее, чем в неподвижном, а максимум температуры T_w может сместиться в сторону меньших z .

Таблица 3.

Аксиальное распределение температуры цилиндрической стенки реакционной камеры $T_w(z)/[T_w(z)]_{\max}$ в неподвижном газе (аргоне) и при продувке через нее аргона
 Параметры ЭП: $U = 28,5$ кВ, $I_b = 3,5$ мА, $P_m = 5$ Торр; размеры реакционной камеры: $D = 30$ мм, $L = 250$ мм; скорость газового потока: $w = 16$ м/с

Направление вдува газа	$(T_w)_{\max}$, К	z , мм				
		50	90	130	170	210
Неподвижный газ	218	0,47	0,86	1	0,86	0,65
К выводному устройству	156	0,86	1	0,72	0,48	0,35
От выводного устройства	115	0,8	1	0,72	0,61	0,57

Важно также, что $[T_w(z)]_{\max}$ и z^* (z^* – сечение цилиндрической реакционной камеры, в котором T_w имеет максимальное значение) зависят от направления вдува газа, а также от величины расхода газа G и скорости течения w . Очевидно, что, чем выше скорость прокачки газа, тем менее нагретой оказывается цилиндрическая стенка реакционной камеры.

На рис. 3а приведены данные, характеризующие влияние давления плазмообразующего газа на вид функции $B(z)$ для кварцевых трубок с металлическим дном. Видно, что эти функции имеют максимумы при некоторых z^* . Если говорить о положении максимумов на достаточно больших расстояниях от торцов трубы, то при относительно низких давлениях P_m эти максимумы находятся на дальней от выводного окна части трубы (т.е. на больших z). По мере увеличения давления плазмообразующего газа (в этих экспериментах – воздуха) максимумы смещаются в сторону меньших z . Наличие таких максимумов и влияние условий генерации плазмы на их локализацию нами неоднократно обсуждалось в опубликованных нами работах [1].

Обращают на себя внимание максимумы на малых расстояниях от переднего (открытого) торца трубы, которые наблюдаются при всех P_m , и максимумы вблизи донной части трубы, которые регистрируются только при меньших P_m . Наличие этих максимумов объясняется следующими обстоятельствами:

- Выходной участок газодинамического окна, через которое ЭП инжектируется в рабочую камеру, является сильно нагретым, а потому яркой точкой. Излучение этого участка выводного окна падает на торец кварцевой трубки, вызывая ее интенсивную люминесценцию. Люминесценцию переднего торца кварцевой трубки иллюстрирует Рис. 3б. В той или иной мере это явление наблюдается при любых P_m , но наиболее оно заметно при больших P_m , когда нагрев выводного окна велик.
- Свечение дна реакционной камеры порождает максимум функции $B(z)$ на дальнем от выводного окна конце трубы. Это свечение может быть следствием двух причин: нагревом дна быстрыми электронами и люминесценцией (например, когда дно тоже кварцевое). Очевидно, что с ростом P_m поглощение и рассеяние ЭП на длине трубки увеличиваются, и все меньше быстрых электронов достигают ее дна. Именно поэтому дополнительный максимум функции $B(z)$ имеет место при низких давлениях плазмообразующего газа, как показано на Рис. 3в.

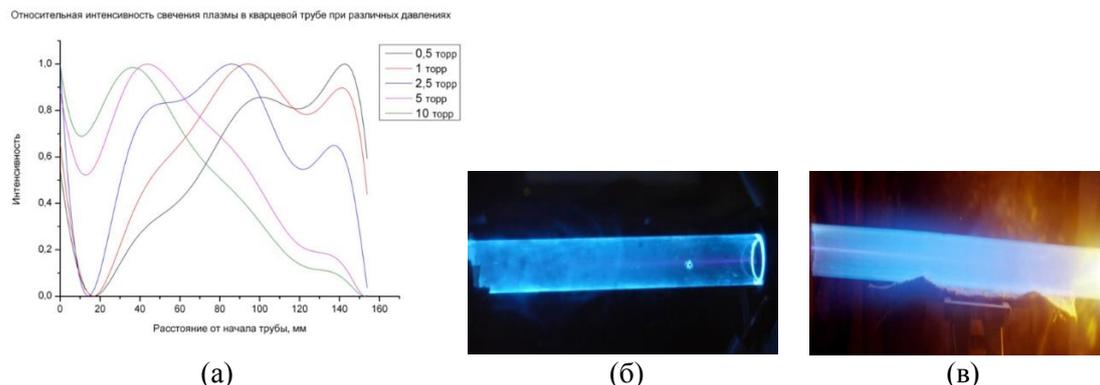


Рис.3. Интенсивность $B(z)$ излучения стенок цилиндрической реакционной камеры (кварцевая труба, $d = 18$ мм), заполненной неподвижной ЭПП воздуха при различных давлениях P_m : (а) - профиль интенсивности $B(z)$, (б) - люминесценция переднего (обращенного к выводному окну) торца камеры, (в) - свечение дна камеры при малых P_m

Весьма интересные явления наблюдались в достаточно коротких реакционных камерах (с отношением длины к диаметру $L/D \sim 1-3$) с заземленным металлическим дном: в поперечных сечениях камер появлялись яркие неподвижные или медленно движущиеся в направлении к выводному окну периодические структуры, похожие на страты в тлеющем газовом разряде. На Рис. 4 приведено фото нашего эксперимента.



Рис.4. Периодические структуры, наблюдавшиеся в экспериментах (плазмообразующий газ воздух, $P_m = 0,5-0,8$ Торр).

ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее успешно продвинулись разработки пучково-плазменных реакторов, предназначенных для плазмохимической модификации материалов со сложной молекулярной структурой, таких синтетические и природные полимеры (биополимеры), поскольку именно такие соединения оказались наиболее восприимчивыми к многофакторному воздействию электронно-пучковой плазмы. Для таких задач возникает принципиальное ограничение на температуру реакционного объема, так как большинство таких материалов не выдерживают сколько-нибудь заметного нагрева. В плазмохимических реакторах, предназначенных для обработки термолабильных материалов, удастся использовать одно из наиболее значимых преимуществ электронно-пучковой плазмы – высокую химическую активность при низких, вплоть до комнатных, температурах. Химическая активность достигается интенсивной наработкой атомов, ионов, и радикалов при достаточно высоких давлениях, недоступных большинству известных генераторов холодной плазмы.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны специализированные блоки для существующей установки, которые обеспечили проведение экспериментов по генерации электронно-пучковой плазмы в пристеночных областях реакционных камер плазмохимических реакторов, предназначенных для обработки твердых материалов, жидкостей и газожидкостных смесей.

2. Методами контактной и оптической термометрии изучены температурные поля различных конструктивных элементов реакционных камер и влияние на эти поля давления плазмообразующего газа, а также интенсивности прокачки плазмообразующей среды через реакционную камеру.
3. В экспериментах с приповерхностной плазмой обнаружены нестационарные явления, которые сопровождаются образованием ярких неподвижных или движущихся периодических структур, похожих на страты в тлеющем газовом разряде;

ЛИТЕРАТУРА

1. *Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, Васильев М.Н.* Генерация электронно-пучковой плазмы внутри диэлектрического контейнера. МФТИ, г. Долгопрудный. Том 12, № 2 (46) 2020 г. С.126-130.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРЕТОВ НА ГРИБОСТОЙКОСТЬ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

THE EFFECT OF THE SURFACE CHARGE OF ELECTRETES ON THE FUNGAL RESISTANCE OF FLUOROCARBON POLYMER MATERIALS

В.М.Елинсон/vm_e@mail.ru, **А.С.Аболентцев** /nasa734@gmail.com
Т.В.Ходырев/xtimur7@gmail.com, **П.А.Щур** /shur-pavel@mail.ru

V.M.Elinson, A.S.Abolentsev, T.V.Khodyrev, P.A.Shchur

Московский авиационный институт (НИУ), Москва.

В данной работе рассматриваются результаты исследования грибостойкости наноструктурированных фторуглеродных плёнок, созданных на поверхности полимеров, в зависимости от величины поверхностного заряда. По-видимому, на грибостойкость плёнки влияет не только поверхностный заряд, но и другие характеристики поверхности, такие как рельеф и химический состав. Фторуглеродные плёнки были сформированы в условиях переходных процессов с использованием двухкомпонентной фторуглеродной газовой смеси ($CF_4 + C_6H_{12}$).

The results of the study of the fungus resistance of nanostructured fluorocarbon films created on the surface of polymers, depending on the value of the surface charge, are considered. Apparently, the fungus resistance of the film is affected not only by the surface charge, but also by other surface characteristics, such as relief and chemical composition. The fluorocarbon films were formed under transient conditions using a two-component fluorocarbon gas mixture ($CF_4 + C_6H_{12}$).

Ключевые слова: ионно-плазменные технологии, фторуглеродные покрытия, полимерные материалы, оптические свойства, поверхностный заряд, электреты, грибостойкость.

Keywords: ion-plasma technologies, fluorocarbon coatings, polymer materials, optical properties, surface charge, electretes, fungus resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные материалы используются во многих областях человеческой жизнедеятельности, например, в космонавтике, медицине и электронике. Их широкое использование связано с уникальными физико-химическими свойствами. Одним из