

15. Amirov I.I., Shumilov A.S., Kupriyanov A.N., Lukichev V.F. Modelling of plasma reactive ion etching of ultra-high aspect ratio Si trenches // “Micro- and nanoelectronics – 2009”. 2009, Moscow-Zvenigorod, Russia. Book of abstracts, O3-22

16. В.М. Елинсон, П.А. Щур, О.А. Сильницкая «Исследование параметров рельефа наноструктурированных фторуглеродных покрытий, сформированных из плазмообразующей смеси  $C_4F_8 + C_6H_{12}$  на полиэтилентерефталате» // Сборник научных трудов XIII Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, 2018, с. 175-180

## **ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ФОРВАКУУМНОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОТРАБОТКИ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ PLASMA-DYNAMIC SETUPS OF FOREVACUUM PRESSURES FOR DEVELOPMENT OF BEAM-PLASMA TECHNOLOGIES**

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

**Йе Хлаинг Хтун**, / yehlainghtun@phystech.edu

**АунгЧжо У** / aungkyaw@phystech.edu

**И.С.Злобин** / zlobin.is@phystech.edu

**В.В.Гараева** / garaewa.nika@yandex.ru

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

**Ye Hlaing Htun, Aung Kyaw Oo, I.S.Zlobin, V.V. Garaeva**

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Московская обл.

*Описаны экспериментальные установки, формирующие потоки сильнонеравновесной химически активной плазмы чистых газов, парогазовых смесей и аэрозолей инжекцией дорелятивистских электронных пучков в указанные плазмообразующие среды. Продемонстрированы возможности применения таких установок для обработки пучково-плазменных производственных и аэрокосмических технологий. В зависимости от решаемых научных и инженерных задач полное давление в плазменном потоке варьировалось в диапазоне 0,1-100 Торр, а его скорость – в диапазоне чисел Маха от нуля до 2,5.*

*Experimental setups forming streams of strongly non-equilibrium chemically active plasmas of pure gases, gas-vapor mixtures and aerosols by injection of sub-relativistic electron beams into above plasma generating media are described. Possible applications of these setups for development of industrial and aerospace beam-plasma technologies are presented. Depending on the scientific or engineering problems to be settled the total pressure of the plasma stream is within the range 0,1-100 Torr and stream velocity could vary from Mach number equal to zero up to 2,5.*

Ключевые слова: *электронно-пучковая плазма, потоки низкотемпературной плазмы, плазменные технологии.*

Key words: *electron-beam plasma, flows of low-temperature plasma, plasma technologies.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В МФТИ разработаны и успешно эксплуатируются плазменные установки, в которых плазма генерируется инжекцией концентрированных электронных пучков (ЭП) в

плотную среду. Этой средой могут служить газы, пары органических и неорганических веществ, парогазовые смеси, а также аэрозоли, содержащие диспергированные жидкости и порошки различных веществ. С использованием пучково-плазменных систем были решены различные задачи применительно к производственным [1] и аэрокосмическим [2] технологиям. В последнее время усилия разработчиков направлены на создание установок, в которых перечисленные выше плазмообразующие среды представляют собой однофазные или гетерофазные потоки, что позволяет существенно расширить спектр решаемых задач, как фундаментальных, так и прикладных.

Характерной особенностью этих установок является то, что в диапазоне форвакуумных давлений газа электронно-пучковая плазма (ЭПП) является сильно неравновесной и обладает высокой химической активностью даже при низких, вплоть до комнатной, температурах. Движение плазмообразующей среды дополнительно интенсифицирует процессы как в самой плазме, так на поверхности объектов, если таковые помещены в плазменный поток. Все это делает плазмодинамические установки на основе ЭПП эффективным инструментом в разработке новых технологий.

Разнообразие способов формирования плазменного потока определяет следующую классификацию пучково-плазменных систем.

1. Установки, в которых плазма возбуждается в свободных струях или в потоках, заполняющих канал и контактирующих с его стенками.

2. И свободные плазменные струи, и течения плазмы в каналах могут быть однофазными (например, потоки газов и парогазовых смесей), или гетерофазными, содержащими частицы конденсированной дисперсной фазы (капли жидкости или порошки).

3. Скорость свободных струй может достигать сверхзвуковых значений с числами Маха вплоть до  $M \approx 2,5$ . Потоки, заполняющие канал, очевидно, являются дозвуковыми.

Ниже будут описаны некоторые конструкторские решения различных типов и эксперименты, проводившиеся на этих установках с целью отработки пучково-плазменных технологий.

## **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Рис. 1 иллюстрирует принцип генерации ЭПП и работу плазмодинамической установки с одной из простейших версий рабочей камеры, использовавшейся, в частности, при отработке плазменно-стимулированной конверсии углеводородов. Плазма генерируется тонким ЭП (3), формируемым размещенной в высоковакуумной камере (2) электронно-лучевой пушкой (1). Пучок инжектируется в заполняемую газом рабочую камеру (6) через выводное устройство (ВУ), в качестве которого использовано газодинамическое окно (4). Внутри рабочей камеры размещается реакционная камера (5), представляющая собой отрезок трубы, один конец которой соединен с системой вакуумной откачки, а второй конец остается открытым: через него в трубу поступает газ из рабочей камеры и инжектируется ЭП для возбуждения плазмы. Предусмотрена подача дополнительных компонентов плазмообразующей среды непосредственно в реакционную камеру: газообразные и/или паровые добавки подавались через специальные сопла, а жидкие добавки – с помощью форсунок различных типов. Установка была разработана как автоматически управляемая система с диагностическим комплексом, отображающим и обрабатывающим данные о режимах работы реактора.

Контроллер ЭП поддерживает работу электронной пушки и источника высокого напряжения, поддерживая ток пучка и ускоряющее напряжение в соответствии с заданными установками. Давление остаточного газа в камере высокого вакуума  $P_{ВВК}$  постоянно контролируется измерителем давления, чтобы предотвратить повреждение пушки при превышении максимально допустимого значения (около  $10^{-5}$  Торр для используемой пушки). Давление  $P_{ВВК}$  зависит от натекания в нее газа  $G_{ВУ}$  через выводное окно; эта утечка компенсируется вакуумным насосом (на схеме не показан).

Основным элементом системы подачи газа является многоканальный контроллер, который управляет клапанами различных типов на вакуумных магистралях и на трубопроводах, подающих плазмообразующие газы. Он сохраняет и отображает предустановленные расходы плазмообразующих газов  $G_1$  и  $G_2$ , давление в рабочей камере  $P_{РК}$ , а также состояние клапана, который контролирует скорость откачки рабочей камеры  $G_0$ . В результате, в реакционной камере удастся поддерживать динамический вакуум в форвакуумном диапазоне давлений и сформировать поток смеси газов заданного компонентного состава или поток аэрозоля; инжекция ЭП вдоль реакционной камеры превращает эти потоки в плазму.

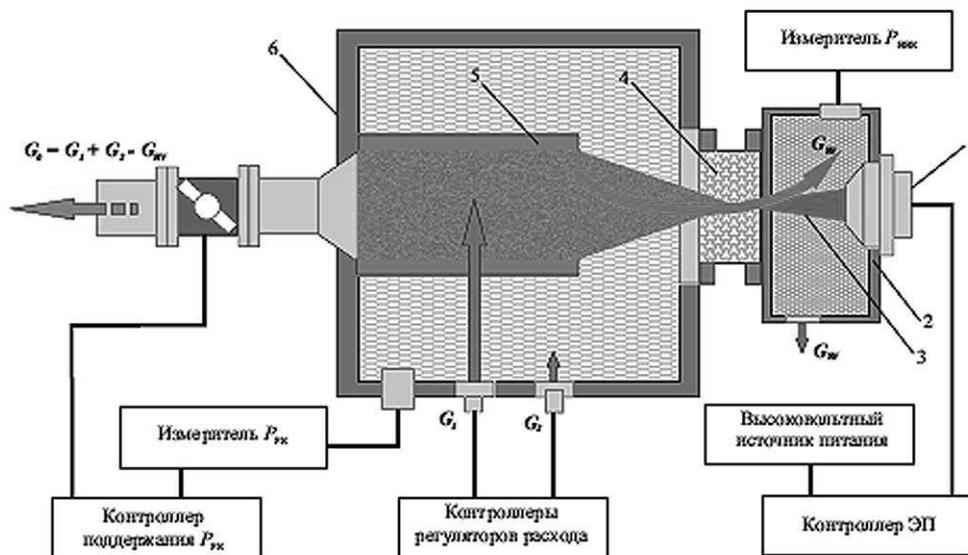


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

Рис. 2 иллюстрирует генерацию плазмы в свободной газовой струе, которая формируется соплом (3) в рабочей камере (2) большого размера. На рисунке схематично изображен вариант установки со сверхзвуковым соплом с центральным телом, конструктивно объединенным с ВУ. Плазмообразующий газ подается в форкамеру сопла и откачивается из рабочей камеры высокопроизводительным форвакуумным насосом. Для торможения сверхзвукового потока на входе в вакуумную магистраль установлен конфузор (6). Плазма возбуждается в реакционной зоне (5), куда могут инжектироваться жидкости или порошки, которые распыляются газовой струей (4).

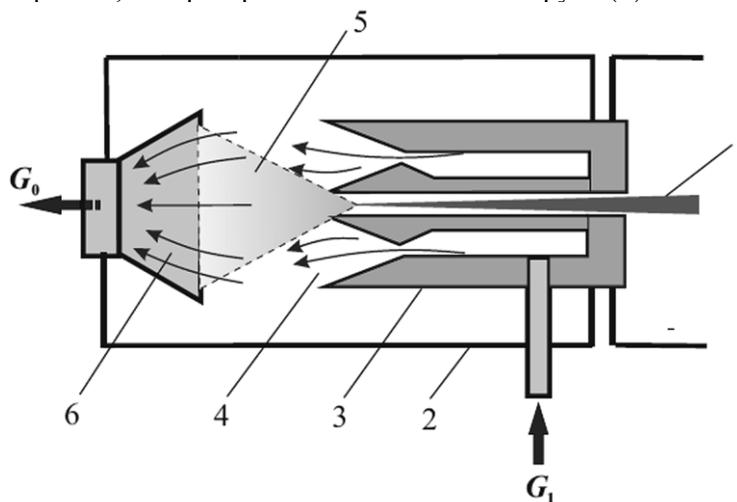


Рис.2. Генерация сверхзвуковой плазменной струи в свободном пространстве.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Варианты разработанных плазмодинамических установок, режимы их работы и параметры генерируемых плазменных потоков иллюстрируются нижеследующими Таблицами:

	Электронный пучок			Плазмообразующая среда			
	Энергия, кэВ	Ток, мА	Режим работы	Полное давление, Торр	Скорость потока, (в числах М)	Состав	
						Основной газ	Добавки
<b>Течения в каналах</b>	20-40	0,2-20	Непрерывный. Импульсный. Импульсно-периодический Сканирование по x, y, z.	0,1-20	0-1,0	Воздух, азот, кислород, аммиак, SF <sub>6</sub> , инертные газы, газообразные углеводороды .	Газообразные и жидкие углеводороды, пары воды и органических веществ, порошки углерода, полимеров и биополимеров .

	Электронный пучок			Плазмообразующая среда			
	Энергия, кэВ	Ток, мА	Режим работы	Полное давление, Торр	Скорость потока, (в числах М)	Состав	
						Основной газ	Добавки
<b>Свободные</b>	30-60	1-100	Непрерывный. Импульсно-периодический	1,0-100	1,0-2,5	Воздух, кислород, газообразные углеводороды .	Газообразные и жидкие топлива, специальные порошкообразные присадки.

## ОБСУЖДЕНИЕ

На описанных выше плазмодинамических установках проводились эксперименты, связанные с производственными и аэрокосмическими технологиями. Дозвуковые течения в цилиндрических каналах характерны для модельных пучково-плазменных реакторов проточного типа, на которых отрабатывались следующие производственные технологии:

- синтез функциональных слоев на поверхности различных органических и неорганических материалов [3];
- управляемая деструкция полимеров и биополимеров с целью получения ценных продуктов и полупродуктов [4];
- синтез гибридных материалов и материалов со специальными биологическими свойствами [5];
- конверсия газообразных и жидких углеводородов;
- модификация углеродных материалов, в том числе двумерных, с целью придания им новых электрических, механических и теплофизических свойств [6].

Свободные плазменные струи использовались в экспериментах по управлению обтеканием тел сверхзвуковыми воздушными потоками и плазменно-стимулированному горению авиационных топлив. Горение газовых и газожидкостных смесей изучалось как в

свободных плазменных потоках, так и в замкнутых объемах при течении таких смесей в каналах различной геометрии.

## **ВЫВОДЫ**

Многочисленные эксперименты, проведенные с использованием пучково-плазменных систем форвакуумного давления, показали, что плазодинамические установки такого типа эффективны для изучения широкого спектра плазменно-стимулированных физических и химических процессов в газовой фазе и на границе контакта плазма-поверхность. Форвакуумный диапазон рабочих давлений обеспечивает получение сильнонеравновесной химически активной плазмы в широком диапазоне условий пучково-плазменного воздействия на плазмообразующие среды различного химического и фазового состава, что позволяет рассматривать потоки газов, парогазовых смесей и аэрозолей, активированные электронным пучком, как основу новых производственных и аэрокосмических технологий.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. M. Vasiliev, T. Vasilieva. Beam plasmas: materials production. In: Encyclopedia of Plasma Technology. Ed. by J. Leon Shohet // Taylor & Francis Inc., USA, 2017, P. 152-166.
2. Ёе Хлаинг Хтун, Аунг Чжо У, Васильев М.Н. Генерация приповерхностной электронно-пучковой плазмы. VIII Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. 10-15 сентября 2018 г., Иваново, Россия. Сборник трудов. С. 154-156.
3. Т.М. Vasilieva, V.V. Garaeva, I.S. Zlobin. Hybrid plasma generators for plasma chemical materials processing // 12th International Conference on Plasma Assisted Technologies (12ICPAT), 2-5 September, 2019, Yalta, Crimea, Russian Federation, P. 13-15.
4. T. Vasilieva, A. Sigarev, D. Kosyakov, N. Ul'yanovskii, E. Anikeenko, D. Chuhchin, A. Ladesov, Aung Myat Hein, V. Miasnikov. Formation of low molecular weight oligomers from chitin and chitosan stimulated by plasma-assisted processes // Carbohydrate Polymers, 2017, 163, P. 54-61.
5. Т.М. Васильева, М.Н. Васильев, В.В. Гараева, И.С. Злобин, ЗауЙеМьинт, Кхин Маунг Хтау, Хтет Вэй Ян Чжо, Хтет Ко Ко Зау. Гибридная плазма – перспективы применения для медицины и биологии // Известия высших учебных заведений. Физика, 2019, 62, 11, С. 123-131.
6. M. Rybin, A. Pereyaslavtsev, T.Vasilieva, V. Myasnikov, I. Sokolov, A. Pavlova, E. Obraztsova, A. Khomich, V. Ralchenko, E. Obraztsova. Efficient nitrogen doping of graphene by plasma treatment // Carbon, 2016, 96, P. 196-202.