

## Краткие сообщения

04

### Генерация пучковой плазмы форвакуумным источником электронов в объеме, ограниченном диэлектрическими стенками

© Д.Б. Золотухин, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: burdov@fet.tusur.ru

(Поступило в Редакцию 4 апреля 2014 г.)

С использованием форвакуумного плазменного источника электронов осуществлена генерация и измерены параметры пучковой плазмы, образованной при инжекции электронного пучка внутрь цилиндрической тонкостенной кварцевой колбы. Выявлены различия в характере зависимостей потенциала и концентрации плазмы от давления газа при создании плазмы внутри диэлектрической колбы и в случае распространения пучка в свободном пространстве.

#### Введение

В последнее время наблюдается заметный интерес к технологиям обработки внутренних поверхностей труб и различных сосудов из диэлектрических материалов (полимеров, керамики, стекла и др.) [1]. Ионно-плазменная модификация [2] представляется одним из наиболее эффективных методов для решения данных задач. Создание плазмы в объеме, ограниченном диэлектрическими стенками, как правило, осуществляется безэлектродным ВЧ-разрядом [3]. Несмотря на ряд достоинств разряда такого типа, его основной недостаток заключается в низкой эффективности передачи энергии плазме, а также в недостаточной мощности и ограниченном диапазоне рабочих давлений. Использование для генерации плазмы ускоренного электронного пучка в значительной мере свободно от недостатков, присущих ВЧ-разряду. Тем не менее применительно к полым диэлектрическим изделиям электронно-лучевая модификация до сих пор не рассматривалась в качестве реальной альтернативы. Возможная причина этого заключается в сложности транспортировки электронного пучка в диэлектрическую полость из-за влияния накопления заряда на поверхности обрабатываемого изделия. Такое влияние заметно ослабляется при распространении электронного пучка в области повышенных давлений (1–100 Па) благодаря генерации в области транспортировки пучка плотной плазмы, нейтрализующей зарядку диэлектрика. Этот диапазон рабочих давлений успешно освоен так называемыми форвакуумными плазменными источниками электронов [4]. Как показали проведенные нами ранее исследования [5], при электронно-лучевой модификации форвакуумными плазменными источниками проводимость обрабатываемого материала не имеет принципиального значения. Успешная демонстрация возможности электронно-лучевой обработки непроводящей керамики [6] стимулировала проведение исследований по

использованию форвакуумного плазменного источника электронов для генерации пучковой плазмы во внутренней области диэлектрического сосуда. Результаты этих исследований представлены в настоящей работе.

#### Техника и методика эксперимента

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Для формирования электронного пучка применялся плазменный источник электронов 1 на основе тлеющего разряда с полым катодом, разработанный специально для форвакуумного диапазона давлений [7]. Источник устанавливался на фланце вакуумной камеры 2, которая откачивалась механическим спиральным насосом ISP-1000C до рабочих давлений 1–15 Па, рабочим газом служил воздух. При подаче напряжения разряда  $U_d$  величиной 450–500 В в источнике зажигался самостоятель-

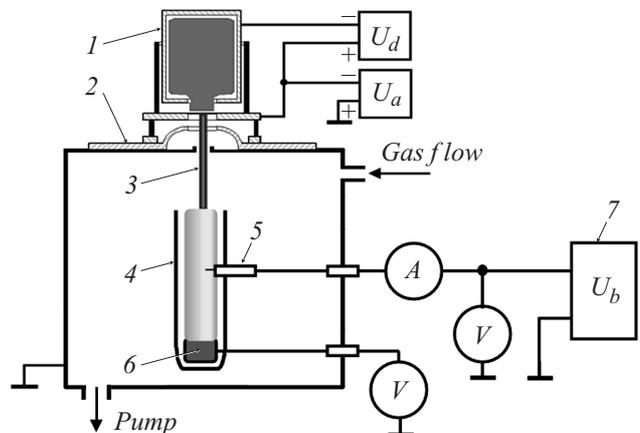


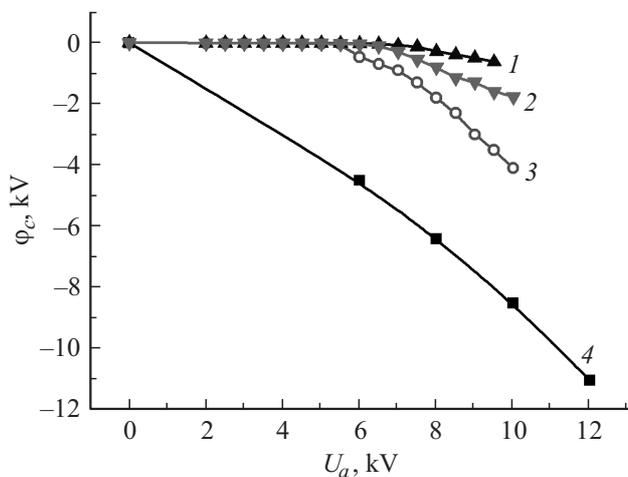
Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — плазменный источник электронов, 2 — вакуумная камера, 3 — электронный пучок, 4 — кварцевая колба, 5 — одиночный зонд, 6 — коллектор, 7 — источник напряжения смещения.

ный тлеющий разряд с полым катодом. Непрерывный электронный пучок 3 с током 10–30 мА извлекался из плазмы разряда и ускорялся напряжением  $U_a$  величиной до 12 кВ. Диаметр пучка составлял 5–10 мм.

Ускоренный электронный пучок инжектировался внутрь цилиндрической тонкостенной кварцевой колбы 4 с внутренним диаметром 40 мм и длиной 200 мм. Для измерения параметров плазмы использовался одиночный зонд Ленгмюра 5, потенциал зонда относительно заземленных стенок камеры задавался источником напряжения смещения  $U_b$ . При этом изменение потенциала пучковой плазмы от давления газа отслеживалось по соответствующей зависимости плавающего потенциала  $\varphi_p$  зонда. Оценка концентрации плазмы  $n$ , создаваемой пучком внутри колбы, осуществлялась по току насыщения на ионной ветви вольтамперной характеристики зонда. Температура  $T_e$  электронов определялась на экспоненциально растущей электронной ветви зондовой характеристики и составляла величину 0.5–2 эВ. На дне колбы устанавливался коллектор 6, электрический вывод от которого мог соединяться с корпусом камеры или быть изолированным от нее. Это давало возможность измерять либо ток пучка на коллектор, либо его плавающий потенциал  $\varphi_c$ . Для сравнения условий генерации плазмы в ряде экспериментов электронный пучок инжектировался в колбу при более низких рабочих давлениях ( $10^{-2}$ – $10^{-1}$  Па). Проводились также сравнения потенциала и плотности плазмы внутри кварцевой колбы и в свободной области транспортировки электронного пучка.

## Результаты эксперимента

На рис. 2 представлены результаты измерения плавающего потенциала  $\varphi_c$  изолированного коллектора в зависимости от ускоряющего напряжения  $U_a$  на ускоряющем промежутке электронного источника для различных давлений

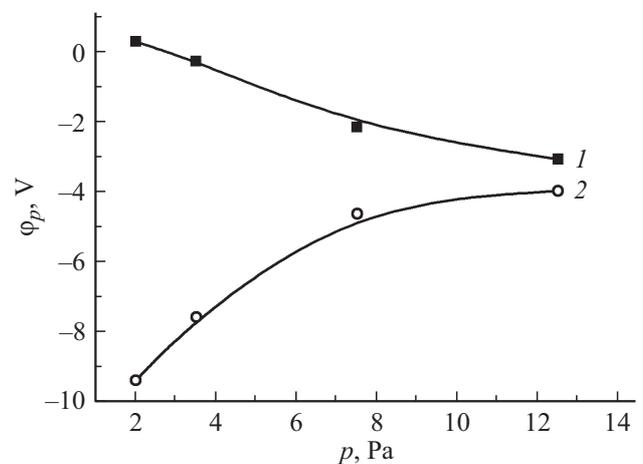


**Рис. 2.** Зависимость потенциала  $\varphi_c$  изолированного коллектора от ускоряющего напряжения  $U_a$  для разных давлений: 1 — 8, 2 — 4, 3 — 2, 4 — 0.01 Па. Ток пучка  $I_b = 20$  мА.

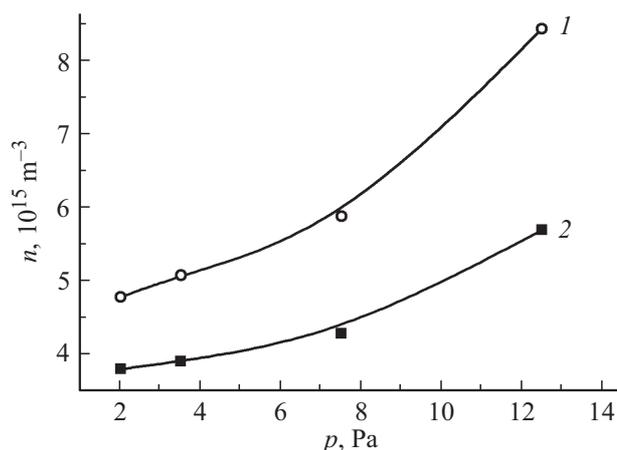
газа. Для форвакуумной области давлений при инжекции электронного пучка в кварцевую колбу плавающий потенциал изолированного коллектора  $\varphi_c$  остается отрицательным и понижается с ростом ускоряющего напряжения  $U_a$ . Абсолютное значение  $\varphi_c$  остается намного меньше  $U_a$ . Зависимость  $\varphi_c$  от  $U_a$  содержит два участка, отражающих различные режимы токопрохождения при инжекции электронного пучка внутрь кварцевой колбы. Для первого режима характерна более высокая интенсивность свечения плазмы внутри колбы, потенциал  $\varphi_c$  максимален и остается практически неизменным с повышением ускоряющего напряжения. Для второго режима (при  $U_a > 5$  кВ) интенсивность свечения заметно ниже, а потенциал  $\varphi_c$  понижается с увеличением  $U_a$ . Обратим внимание на тот факт, что при более низких давлениях не форвакуумного диапазона (кривая 4) потенциал изолированного коллектора практически достигает величины напряжения, ускоряющего электроны.

Полученные результаты дают основания для предположения о возможном возникновении в первом режиме токопрохождения пучково-плазменного разряда (ППР), наблюдавшегося ранее [8] при свободном распространении пучка в форвакуумной области давлений. Даже при наличии диэлектрика, охватывающего коллектор, плазма ППР с более высокой концентрацией обеспечивает беспрепятственное стекание заряда с поверхности коллектора и практическую неизменность его потенциала. Повышение энергии электронов нарушает условия существования ППР, уменьшает плотность пучковой плазмы и тем самым обуславливает понижение потенциала коллектора.

Различия в условиях транспортировки пучка в свободном пространстве и при его инжекции в объем, ограниченный диэлектрическими стенками кварцевой колбы, иллюстрируются результатами измерений плавающего потенциала  $\varphi_p$  зонда и концентрации плазмы  $n$ , представленными на рис. 3 и 4 соответственно. При



**Рис. 3.** Зависимость плавающего потенциала зонда Ленгмюра от давления газа: 1 — при свободном распространении пучка, 2 — пучок в колбе.  $U_a = 3$  кВ,  $I_b = 20$  мА.



**Рис. 4.** Зависимость концентрации плазмы от давления газа: 1 — пучок в колбе, 2 — при свободном распространении пучка. Ускоряющее напряжение 3 kV, ток пучка 20 mA.

свободном распространении пучка  $\varphi_p$  близок к нулю и слегка снижается при повышении давления. В случае инжекции пучка в колбу при минимальном давлении потенциал  $\varphi_p$  резко отрицательный, но затем заметно повышается с ростом давления газа.

Поскольку поведение  $\varphi_p$  отражает поведение потенциала пучковой плазмы, то наблюдаемые тенденции в изменении  $\varphi_p$  с повышением давления при свободном распространении пучка и при инжекции пучка в колбу могут быть связаны с доминированием различных факторов в процессах удержания и потерь плазменных электронов. В отличие от потенциала, концентрация плазмы в обоих случаях растет с повышением давления газа (рис. 4), однако внутри колбы ее концентрация выше.

## Заключение

Таким образом, продемонстрирована возможность создания пучковой плазмы внутри диэлектрического сосуда с помощью форвакуумного плазменного источника электронов. Экспериментальные исследования параметров созданной пучковой плазмы показали, что потенциал плазмы внутри сосуда отрицателен, но повышается с ростом давления. Концентрация пучковой плазмы в сосуде оказалась выше концентрации плазмы, созданной пучком в свободном пространстве. Нейтрализация зарядки внутренней поверхности сосуда может быть более эффективной в случае выполнения условий зажигания пучково-плазменного разряда. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения электронного пучка для генерации плазмы с целью ионно-плазменной модификации внутренних поверхностей изделий из диэлектрических материалов.

Авторы выражают благодарность И.В. Осипову за предложенную тему исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-98087).

## Список литературы

- [1] Sakudo N., Ikenaga N., Ikeda F., Nakayama Y., Kishi Y., Yajima Z. // AIP Conference Proceedings. 2011. Vol. 1321. N 266. P. 266–269.
- [2] Ионно-плазменная и ионно-лучевая модификация материалов / К.К. Кадыржанов, Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк, В.С. Русаков, Т.Э. Туркебаев. М.: Изд-во МГУ, 2005. 639 с.
- [3] Conrads H., Schmidt M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. Vol. 9. N 4. P. 441–454.
- [4] Burdovitsin V.A., Oks E.M. // Laser and particle beams. 2008. Vol. 26. N 4. P. 619–635.
- [5] Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 11. С. 61–66.
- [6] Burdovitsin V.A., Klimov A.S., Medovnik A.V., Oks E.M. // Plasma Sources Science and Technology. 2010. Vol. 19. N 5. P. 20–26.
- [7] Бурдовицин В.А., Жирков И.С., Окс Е.М., Осипов И.В., Федоров М.В. // ПТЭ. 2005. № 6. С. 66–68.
- [8] Жирков И.С., Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Осипов И.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 6. С. 106–110.