

Сравнительные характеристики пучковой и индуктивно-связанной ВЧ-плазмы, генерируемой в диэлектрической полости в форвакуумном диапазоне давлений (обзор)

Д. Б. Золотухин

В обзоре приводится сравнительный анализ результатов экспериментов по исследованию параметров и характеристик плазмы, создаваемой различными способами в диэлектрическом сосуде: при инжекции непрерывного электронного пучка током 10–40 мА и энергией 2–8 кэВ в цилиндрическую кварцевую полость, а также безэлектродным индуктивным ВЧ-разрядом, генерируемым внешней квадрупольной антенной, причем в форвакуумном диапазоне давлений (1–15 Па) рабочих газов (Ar, N₂). Приводятся сравнения продольных и радиальных профилей концентрации, а также величин температуры электронов и потенциала, характерных для упомянутых видов плазмы. Показано, что оба способа позволяют осуществить генерацию однородной плазмы в диэлектрической полости с концентрацией 10^9 – 10^{11} см⁻³ и температурой электронов 2–4 эВ.

Ключевые слова: пучковая плазма, индуктивно-связанная ВЧ-плазма, диэлектрическая полость, форвакуумный плазменный источник электронов, форвакуумная область давлений.

Введение

В настоящее время растет интерес к генерации плазмы внутри диэлектрических (полимерных или стеклянных) трубок [1], контейнеров и сосудов [2]. Плазма внутри таких объектов создается с целью улучшения параметров их поверхности, например, в интересах совместимости с биологическими жидкостями и тканями [1], для повышения барьерных свойств к различным газам [2] и снижения расслаиваемости, а также для стерилизации [3].

Для генерации плазмы в диэлектрическом объеме обычно используется импульсный тлеющий [1], высокочастотный [2, 3] и микроволновый (2,45 ГГц) [2] разряды.

Импульсный тлеющий разряд является достаточно простым и дешевым, однако подразумевает получение плазмы с высоким (до нескольких кВ) потенциалом относительно стенок полости, что неизбежно приводит к не всегда желательному ионному распылению стенок.

Одним из наиболее распространенных методов создания низкотемпературной плазмы внутри диэлектрических сосудов является индуктивный ВЧ-разряд. В устройствах, реализующих разряд этого типа, диэлектрический сосуд с рабочим газом помещается в катушку с переменным ВЧ-током. Индуцируемое переменное магнитное поле внутри сосуда создает замкнутое электрическое поле, приводящее к ионизации газа и порождающее вихревые токи. Таким образом, в сосуде генерируется индуктивно-связанная ВЧ-плазма. Особенностью такого разряда является тот факт, что токи, текущие в плазме, являются вихревыми, и это снимает проблему удаления заряда из диэлектрического объема. Другим преимуществом является более низкий потенциал плазмы относительно стенок (величиной порядка десятков-сотен вольт), что ниже величин, характерных для импульсного тлеющего разряда, а поэтому менее интенсивно идет процесс распыления стенок. К числу недостатков метода можно отнести необходимость согласования импедансов генератора и плазменной нагрузки, принципиальное наличие оптимума способности плазмы поглощать доставляемую от генератора мощность [4], а также «паразитную» емкостную связи с электродами.

Микроволновый (СВЧ) разряд [5, 6] позволяет создать внутри диэлектрического объема плазму с широким диапазоном параметров, причем в разрядах такого типа стенки сосуда находятся под пла-

Золотухин Денис Борисович, научный сотрудник, к.ф.-м.н. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. 8 (953) 922-23-02.
E-mail: ZolotukhinDen@gmail.com

Статья поступила в редакцию 9 марта 2017 г.

© Золотухин Д. Б., 2017

вающим потенциалом, и, следовательно, проблема ионного распыления стенок практически отсутствует. Однако установки для реализации микроволновых разрядов обычно сложны и состоят из множества элементов (генератор, циркулятор, направленный ответвитель, согласующая цепь, аппликатор). Кроме того, при высоких уровнях мощности в передающих линиях часто возникает нежелательный мультипакторный разряд [5, 7], что несколько ограничивает широкое распространение таких установок.

Ионизация газа пучком ускоренных электронов является одним из наиболее эффективных способов генерации плазмы, так как для пучка с энергией электронов порядка единиц кэВ сечение ионизации преобладает над остальными сечениями взаимодействия [8]. Кроме того, энергия пучка используется весьма эффективно, поскольку около половины энергии, передаваемой пучком газу, идет именно на ионизацию [9], а сами параметры плазмы (концентрация, температура электронов) могут очень удобно и гибко регулироваться током и энергией пучка, а также давлением и составом газа [8–11]. Типичный потенциал пучковой плазмы относительно стенок вакуумной камеры не превышает нескольких вольт, температура электронов – порядка 1 эВ, а концентрация легко может варьироваться в диапазоне 10^9 – 10^{12} см⁻³. Эти особенности пучковой плазмы делают ее удобным инструментом для обработки сосудов из таких материалов, как чувствительные полимеры [11]. С учетом упомянутых преимуществ, очень привлекательным выглядит создание пучковой плазмы внутри ограниченного диэлектрическими стенками объема, причем при давлениях газа порядка единиц-десятков Па. В настоящее время активно создаются установки, в которых электронно-пучковая плазма генерируется при напуске струи активного газа в область электронного пучка [12, 13], а также при инъекции электронного пучка в область повышенного давления газа с использованием систем дифференциальной откачки [14]. Преимущества форвакуумных источников электронов [15], а именно, их уникальная способность непосредственной обработки диэлектрических материалов любой формы как непрерывным, так и импульсным электронным пучком, делают привлекательным их использование для генерации в полости плазмы, параметры которой могут плавно и в широких пределах регулироваться током, энергией пучка и давлением.

Указанные обстоятельства делают весьма актуальной постановку задачи об исследовании параметров и режимов генерации пучковой плазмы внутри диэлектрических сосудов с помощью форвакуумного источника электронов. Ранее [16] продемонстрирована возможность генерации пучко-

вой плазмы в полости при давлениях 1–10 Па, а также показано, что температура электронов и концентрация такой плазмы выше, чем при ее генерации в отсутствие полости, в тех же экспериментальных условиях. В работе [17] предложена модель, объясняющая повышенные параметры пучковой плазмы в полости дополнительным энерговкладом вторичных электронов, ускоренных в пристеночных и придонных ионных слоях сосуда, в который инжектируется пучок.

Таким образом, для более полного понимания особенностей и выявления преимуществ и недостатков генерации пучковой плазмы внутри диэлектрического сосуда в форвакуумной области давлений выглядит уместным ее сравнение с плазмой, получаемой другим широко применяемым методом, а именно, с помощью индуктивного ВЧ-разряда. Этой цели и посвящена данная работа.

Оборудование и методика эксперимента

Пучковая плазма

Установка для исследования пучковой плазмы в диэлектрической полости (см. рис. 1, а) содержала в себе форвакуумный плазменный источник 1 электронного пучка [15]. Этот источник 1 был установлен на фланце заземленной вакуумной камеры 2 из нержавеющей стали. Вакуум обеспечивался форвакуумным спиральным безмасляным насосом ISP-1000С, обеспечивающим минимальное давление в камере около 1 Па. Давление измерялось термопарной частью ПМТ-2 вакуумметра ВИТ-2.

При рабочих давлениях 1–15 Па (аргон или азот) источник генерировал непрерывный электронный пучок 3 с током 10–40 мА и энергией $eU_a = 2$ –8 кэВ. Пучок затем фокусировался до диаметра 4–6 мм короткой магнитной системой, которая являлась неотъемлемым элементом форвакуумного источника. В пространстве вакуумной камеры сфокусированный пучок распространялся уже в отсутствие удерживающего магнитного поля. Далее пучок электронов инжектировался в цилиндрическую кварцевую полость 5 и создавал внутри нее пучковую плазму 4. Указанная полость была выполнена в виде кварцевой плоскодонной колбы (стакана) длиной $l = 20$ см, внутренним диаметром $2r = 4$ см и толщиной стенок 2 мм.

Для исследования продольного распределения параметров плазмы внутри полости в неё вводился набор из пяти одинаковых плоских зондов Ленгмюра 6 через круглые отверстия диаметром 6 мм в боковой стенке. Диаметр плоского медного наконечника каждого из зондов 7 был 3 мм. Наконечники зондов располагались на расстоянии 15 мм от оси пучка, а средний зонд был размещен на полу-

высоте полости. Для оценки радиального распределения параметров плазмы использовался один из зондов, способный перемещаться с помощью манипулятора на расстояние от 0 до 20 мм от оси пучка по радиусу полости на полувысоте полости. Параметры плазмы вычислялись с помощью специально созданного программного обеспечения, а именно, по известной методике температура электронов T_e вычислялась по полулогарифму электронного тока, концентрация плазмы n – по ионной ветви зондовой характеристики с приме-

нением теории орбитального лимитационного движения, а потенциал плазмы ϕ_p определялся по максимуму первой производной зондового тока по напряжению, подаваемого на зонд. Опорным электродом для зондовых измерений пучковой плазмы в диэлектрической полости служили заземленные стенки вакуумной камеры 2. Систематическая погрешность оценки параметров плазмы по зондовой характеристике устранялась тщательной подготовкой эксперимента, а случайная погрешность не превышала 10–15 %.

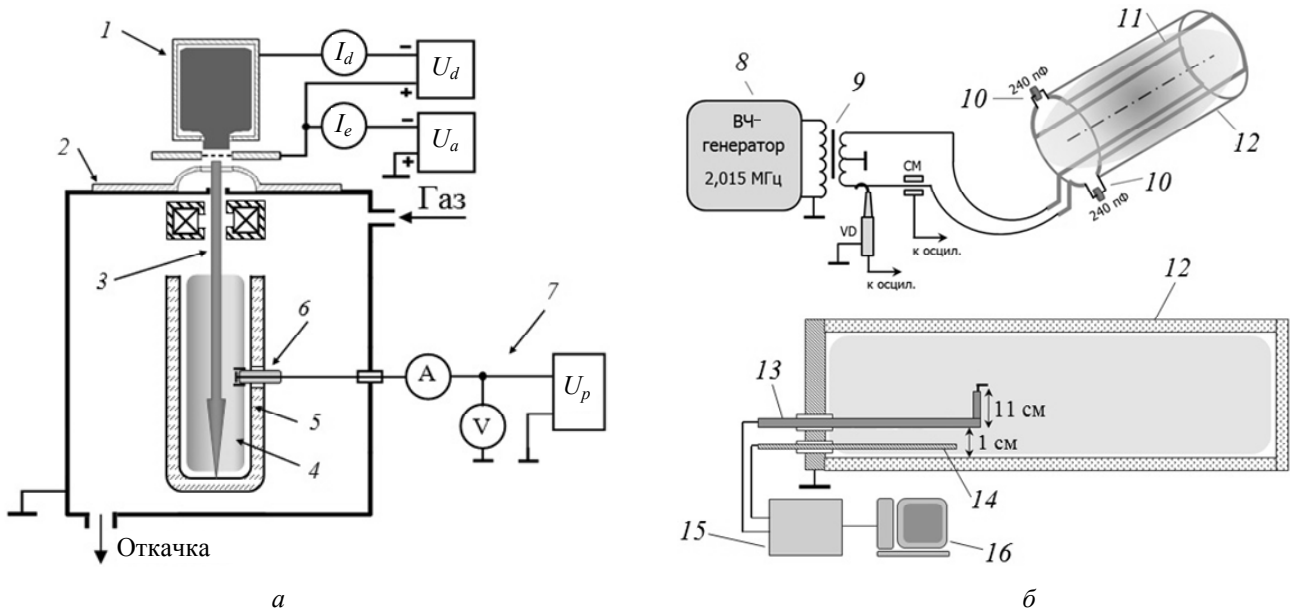


Рис. 1. Схемы экспериментов: а) установка для генерации пучковой плазмы в диэлектрическом объеме: 1 – электронный источник, 2 – вакуумная камера, 3 – электронный пучок, 4 – пучковая плазма, 5 – полость, 6 – зонд Ленгмюра, 7 – схема зондовых измерений; б) сверху – схема эксперимента по генерации индуктивной ВЧ-плазмы в диэлектрическом объеме: 8 – генератор, 9 – трансформатор, 10 – конденсаторы, 11 – антенна, 12 – диэлектрическая камера; снизу – схема исследования пространственных профилей параметров ВЧ-плазмы: 13 – зонд Ленгмюра, 14 – электрод, 15 – анализатор, 16 – компьютер.

ВЧ-плазма

Схема установки для исследования ВЧ-плазмы в диэлектрическом объеме приведена на рис. 1, б. Эксперименты проводились в лаборатории физики плазмы Израильского Технологического Института (Технион) под руководством профессора Я. Е. Красика. Плазма генерировалась в режиме одиночных импульсов длительностью 300–350 мс внутри цилиндрической камеры 12 длиной $L = 1$ м и внутренним диаметром $2R = 20$ см, выполненной из диэлектрика (пайрекса). Система откачки, состоящая из форвакуумного (Alcatel 2004A) и турбомолекулярного (Turbovac 1000C) насосов, предварительно откачивала камеру до предельного давления 3×10^{-3} Па. Напуском аргона или гелия устанавливалось нужное рабочее давление (0,8–10 Па), измеряемое вакуумметром марки Edwards. Источником тока в антенне 11 служил работающий на

частоте 2,015 МГц ВЧ-генератор 8 марки HFV8000 с регулируемой мощностью до 8 кВт. Генератор через симметричный понижающий трансформатор 9 был подключен к квадрупольной антенне 11, охватывающей снаружи камеру и имевшей 4 витка, причем каждый виток состоял из 4 изолированных одножильных медных проводов диаметром 2 мм. В целях согласования импедансов антенны с плазмой и генератора, два согласующих конденсатора 10 по 240 пФ каждый были вставлены в разрыв антенны симметрично относительно ее «ветвей». Эти емкости были подобраны из соображений равенства резонансной частоты контура (антенна с конденсаторами) и генератора. Напряжение на выходе антенны измерялось высоковольтным щупом VD (Tectronix P6015-A), ток в антенне измерялся поясом Роговского (Pearson CM-10-M).

Затрачиваемая на создание плазмы мощность P_p вычислялась по известной формуле [4]:

$P_p = 2\langle I(t) \times U(t) \rangle - I^2 R_0$, в которой $U(t)$, $I(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока на выходе антенны (при наличии плазмы), I – среднеквадратичное значение тока в антенне с плазмой, R_0 – эффективное сопротивление системы (без плазмы). Величина R_0 определялась по формуле $R_0 = 2\langle I_0(t) \times U_0(t) \rangle / I_0^2$, в которой значения тока и напряжения приведены в отсутствие плазмы.

Для описываемой системы $R_0 \approx 5$ Ом, а сопротивление при наличии плазмы было 30–50 Ом. Параметры ВЧ-плазмы и их пространственные распределения исследовались зондом Ленгмюра 13, оснащенный анализатором МФРА фирмы Plasma Sensors (США), для чего боковой торец полости был выполнен в виде заземленного фланца, служащим опорным электродом для зонда. Наконечник зонда представлял собой вольфрамовый цилиндр длиной 5 мм и диаметром 0,1 мм. Зонд Ленгмюра был установлен на длинную (80 см) керамическую трубку, подвижную в продольном и радиальном направлениях. Для компенсации нежелательных ВЧ-шумов вблизи керами-

ческой трубки в полость был введен металлический стержень 14, а анализатор зонда 15 имел встроенный фильтр.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Экспериментальные данные для двух экспериментальных установок для удобства сравнения представлены на одних и тех же рисунках.

Рис. 2 демонстрирует, что для обоих типов плазмы концентрация n растет, а температура электронов T_e падает с ростом давления. Отметим, что для пучковой плазмы в полости характерен значительный рост T_e с понижением давления до 1–3 Па, что может быть связано с повышением энерговклада вторичных электронов, ускоренных в увеличивающейся (с понижением давления) разности потенциалов между плазмой и дном полости [17].

На рис. 3 показаны характерные значения потенциалов обоих типов плазмы в диэлектрической полости (измеренные относительно заземленных электродов или стенок камеры).

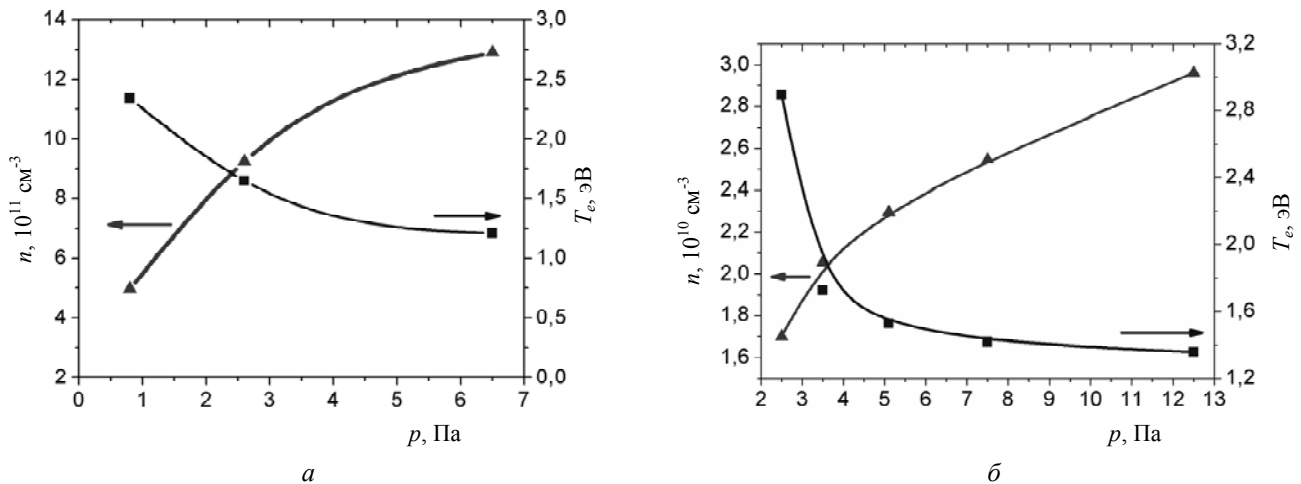


Рис. 2. Параметры плазмы в зависимости от давления: а) для ВЧ-плазмы (Ar, 1 Па, $P_p = 900$ Вт, измерения выполнены в середине полости на ее оси), и б) для пучковой плазмы в полости (N_2 , ток пучка 10 мА, энергия пучка 3 кэВ, зонд расположен на полувысоте полости, на расстоянии в 1 см от ее оси).

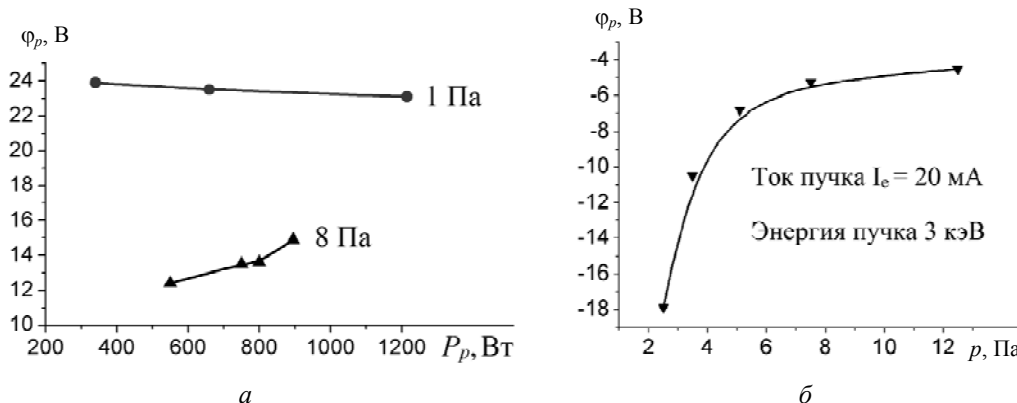


Рис. 3. Потенциалы ВЧ- (а) и пучковой плазмы (б) в диэлектрических полостях (Ar).

Потенциал ВЧ-плазмы имеет величину порядка нескольких десятков вольт и, как известно, включает в себя определяемое температурой электронов падение напряжения в пристеночном слое, а также, в меньшей степени, амбиполярный потенциал, зависящий от разницы концентраций плазмы в центре и на периферии. Напротив, по-

тенциал пучковой плазмы в диэлектрической полости практически всегда отрицателен, что, по видимому, связано с инъекцией внутрь полости отрицательного заряда.

Особенности продольных профилей концентрации n пучковой и ВЧ-плазмы, созданных в диэлектрической полости, иллюстрируются рис. 4.

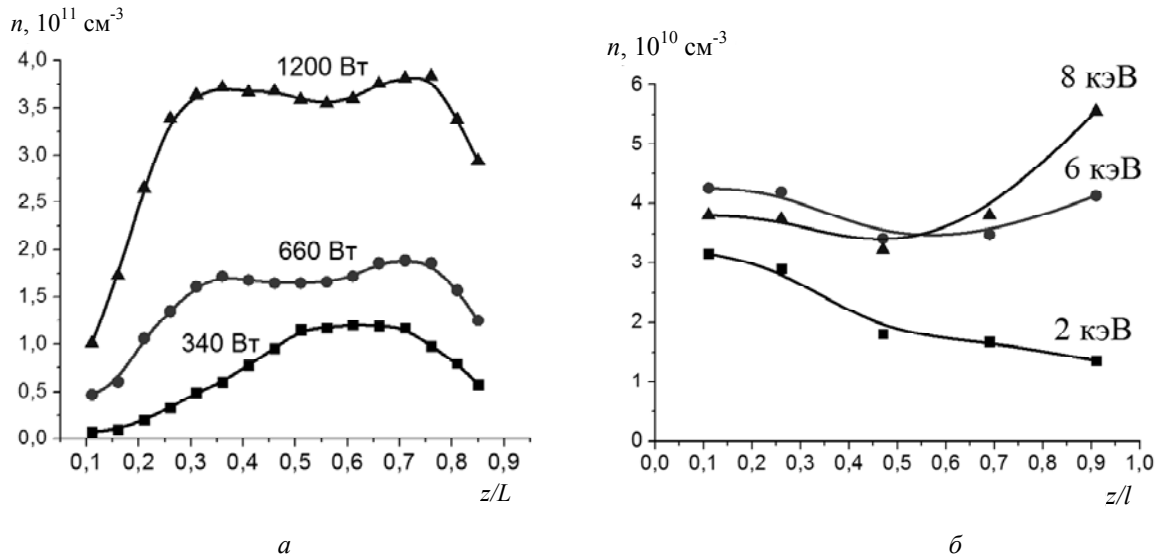


Рис. 4. Продольные распределения концентрации: а) ВЧ-плазмы (Ar , 1 Па) [19], и б) пучковой плазмы (N_2 , 7,5 Па, ток пучка 15 мА), в диэлектрической полости. Продольная координата z нормирована на длины соответствующих полостей.

Из рис. 4, а видно, что продольное распределение концентрации ВЧ-плазмы при достаточно высоком уровне P_p (свыше 340 Вт) представляет собой довольно однородное плато длиной около 60 см. Такое же однородное распределение концентрации по длине характерно и для пучковой плазмы в диэлектрической полости, причем при оптимизированных энергии пучка и давлении газа (рис. 4, б). Отличительной особенностью продольного профиля концентрации пучковой плазмы в диэлектрической полости является тот факт, что при определенных условиях концентрация плазмы как возрастает, так и спадает по направлению ко дну полости. Температура электронов T_e обоих типов плазмы практически не зависела от пространственных координат. По абсолютной величине T_e ВЧ-плазмы (2–4 эВ) оказалась сравнимой с T_e пучковой плазмы (1,5–3 эВ) и заметно выше, чем в плазме, генерируемой в условиях свободного распространения пучка в отсутствие полости (типичная величина менее 1 эВ).

На рис. 5 сравниваются нормированные радиальные профили концентрации плазмы обоих типов.

Концентрация ВЧ-плазмы спадает в радиальном направлении сильнее (на 55–60 %), чем пучковая плазма (примерно, на 20 %), что может быть связано с гораздо большим диаметром полости,

содержащей ВЧ-плазму (20 см), по сравнению с диаметром полости с пучковой плазмой (4 см) и, как следствие, с более заметным спадом концентрации плазмы вследствие рекомбинации.

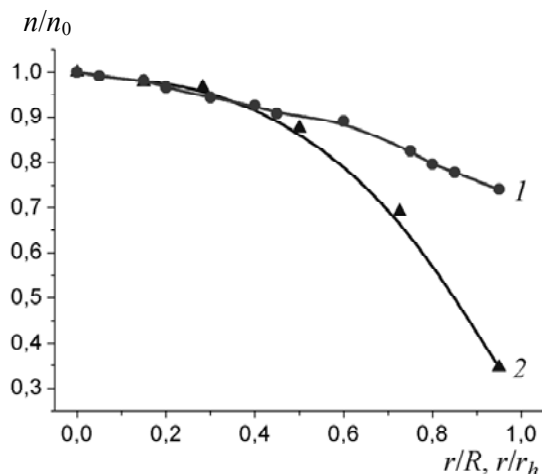


Рис. 5. Продольные распределения концентрации пучковой плазмы в диэлектрической полости (1, Ar , 2 Па, ток пучка 40 мА, энергия пучка 3 кэВ, $n_0 = 5,4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$), и ВЧ-плазмы (2, Ar , 1 Па, $P_p = 916 \text{ Вт}$, концентрация плазмы при нулевой координате $n_0 = 5,37 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$). Радиальная координата r нормирована на радиусы соответствующих полостей.

Сравнивая энергетическую эффективность двух упомянутых способов генерации плазмы, от-

метим, что в обоих способах непосредственно в ионизации газа участвует лишь малая часть электронов, т. е. электроны из высокоэнергичного «хвоста» функции распределения плазменных электронов по энергиям в случае ВЧ-плазмы, и пучковые и вторичные электроны в случае пучковой плазмы. Энергетическую цену ионов η для обоих случаев можно оценить по формулам из работы [19]:

$$\eta_{RF} = \frac{P_p}{0,4en_{ed}\sqrt{2kT_e/M_iS_{ves}}},$$

$$\eta_{bp} = \frac{I_bU_a[1 - \exp(-I_h/\lambda_{Rb})]}{0,4en_{ed}\sqrt{2kT_e/M_iS_h}},$$

где n_{ed} – концентрация на границе плазмы, $S_{ves} = 0,88 \text{ м}^2$ и $S_h = 0,026 \text{ м}^2$ – площади внутренних поверхностей диэлектрических сосудов, содержащих ВЧ- и пучковую плазму соответственно, e – заряд электрона, M_i – масса иона, λ_{Rb} – длина релаксации энергии электронов пучка, которая для типичных значений давления газа (13 Па) и энергии пучка (2 кэВ) имеет величину около 116 см.

В числителе используемых формул находится мощность, вкладываемую в плазму, а в знаменателе – бомовский ток ионов с плазменной границы на поверхность соответствующего сосуда. При генерации ВЧ-плазмы η_{RF} составляет 25–30 эВ/ион, а для пучковой плазмы в полости η_{bp} выше и находится в диапазоне 33–90 эВ/ион, в то время как вкладываемая в плазму мощность составляет порядка сотен Вт для ВЧ-плазмы, и единицы Вт – для пучковой.

Несмотря на малый вклад мощности в плазму по сравнению с полной мощностью пучка и повышенную цену иона при генерации пучковой плазмы в полости, энергия пучка, в конечном итоге, может быть использована достаточно эффективно. Так, она дополнительно может быть направлена для испарения находящихся на дне материалов, обеспечения большой разности потенциалов между дном и плазмой с целью осуществления ионного травления, возбуждения пучково-плазменных колебаний или организации в объеме полости плазмохимических реакций.

Заключение

В работе показано, что при давлениях рабочего газа форвакуумного диапазона (1–15 Па) оба способа обеспечивают генерацию однородной плазмы с концентрацией 10^9 – 10^{11} см^{-3} и температурой электронов 2–4 эВ. Энергетическая цена иона при генерации плазмы в результате инжек-

ции пучка полость оказывается несколько выше, чем при использовании ВЧ-разряда, однако этот недостаток может компенсироваться более гибким управлением параметрами плазмы при варьировании тока, энергии пучка и давления газа, а также отсутствием необходимости согласования импедансов плазменной нагрузки и генератора. Кроме того, часть энергии пучка (не использованной на ионизацию) может быть потрачена, например, на поддержание плазмохимических реакций.

Следует также отметить, что потенциал пучковой плазмы относительно стенок диэлектрического сосуда может регулироваться в достаточно широких пределах – от единиц вольт (что дает возможность обрабатывать такие чувствительные материалы, как полимеры) до сотен и тысяч вольт (при повышенных энергиях пучка и низких давлениях), что может быть использовано для организации селективного ионного травления образцов, располагаемых на дне диэлектрической полости.

Работа была поддержана Фондом содействия инновациям (грант УМНИК, договор № 10804ГУ2/2016).

ЛИТЕРАТУРА

1. Major R., Lackner J. M., Gorka K., Wilczek P., Major B. // RSC Advances. 2013. Vol. 3. P. 11283.
2. Deilmann M., Theiß S., Awakowicz P. // Surf. Coat. Technol. 2008. Vol. 2. P. 1911.
3. Deilmann M., Halfmann H., Bibinov N., Wunderlich J., Awakowicz P. // J. Food Prot. 2008. Vol. 71. No. 10. P. 2119.
4. Кралькина Е. А. // УФН. 2008. Т. 178. № 5. P. 519.
5. Lebedev Yu. A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2015. Vol. 24. P. 1.
6. Conrads H., Schmidt M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. Vol. 9. No. 4. P. 441.
7. Сахаров А. С., Иванов В. А., Кобышев М. Е. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 99.
8. Leonhardt D., Walton S. G., Fernsler R. F. // Phys. Plasmas. 2007. Vol. 14. P. 057103.
9. Petrov G. M., Boris D. R., Petrova Tz. B., Lock E. H., Fernsler R. F., Walton S. G. // Plasma Sources Sci. Technol. 2013. Vol. 22. P. 065005.
10. Lock E. H., Fernsler R. F., Walton S. G. // Plasma Sources Sci. Technol. 2008. Vol. 17. No. 2. P. 025009.
11. Lock E. H., Petrovykh D. Y., Mack P., Carney T., White R. G., Walton S. G., Fernsler R. F. // Langmuir. 2010. Vol. 26. No. 11. P. 8857.
12. Sharafutdinov R. G., Skrynnikov A. V., Parakhnevich A. V., Ayupov B. M., Badalian A. M., Polyakov O. V., Baklanov M. R., Mogilnikov K. P., Biryukov S. A. // J. Appl. Phys. 1996. Vol. 79. P. 7274.
13. Sharafutdinov R.G., Khmel S. Ya., Shchukin V. G., Ponomarev M. V., Baranov E. A., Volkov A. V., Semenova O. I., Fedina L. I., Dobrovolsky P. P., Kolesov B. A. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2005. Vol. 89. P. 99.

14. Бычков В. Л., Васильев М. Н., Зуев А. П. // Теплофизика высоких температур. 1994. Т. 32. № 3. С. 323.

15. Бурдовицин В. А., Бакеев И. Ю., Зенин А. А., Золотухин Д. Б., Казаков А. В., Климов А. С., Медовник А. В., Окс Е. М., Тюньков А. В. // Доклады ТУСУР. 2016. Т. 19. № 2. С. 5.

16. Золотухин Д. Б., Бурдовицин В. А., Окс Е. М. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 5. С. 142.

17. Zolotukhin D. B., Burdovitsin V. A., Oks E. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2015. Vol. 25. No. 2. P. 015001.

18. Shafir G., Zolotukhin D.B., Godyak V.A., Gleizer S., Slutsker Ya., Gad R., Bernshtam V., Ralchenko Yu., Krasik Ya. E. // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. Vol. 26. No. 2. P. 025005.

19. Дудин С. В., Зыков А. В., Положий К. И., Фаренник В. И. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 22. С. 33.

PACS: 52.50.Dg

Comparative characteristics of beam-produced and inductively coupled RF plasmas generated in dielectric volume at fore-vacuum pressures (a review)

D. B. Zolotukhin

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
40 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: ZolotukhinDen@gmail.com

Received March 9, 2017

The review contains the comparative analysis of experiments on research of parameters and characteristics of plasma generated in dielectric volume by two different methods – by injection of continuous electron beam with current of 10–40 mA and energy of 2–8 keV, in cylindrical quartz hollow, and by traditional method using electrodeless inductively-coupled RF discharge driven by quadrupole antenna. These two kinds of plasmas both were produced in fore-vacuum pressure range (1–15 Pa) of working gases (Ar, N₂). We compare the axial and radial profiles of plasma density, and values of parameters (electron temperature and potential) of mentioned plasmas. It is shown that both methods allow one to produce uniform plasma inside the dielectric volume, with density of 10^9 – 10^{11} cm⁻³ and electron temperature of 2–4 eV.

Keywords: beam plasma, inductively coupled RF plasma, dielectric volume, fore-vacuum plasma-cathode electron source, fore-vacuum pressure range.

REFERENCES

1. R. Major, J. M. Lackner, K. Gorka, P. Wilczek, and B. Major, RSC Advances. **3**, 11283 (2013).

2. M. Deilmann, S. Theiß, and P. Awakowicz, Surf. Coat. Technol. **2**, 1911 (2008).

3. M. Deilmann, H. Halfmann, N. Bibinov, J. Wunderlich, and P. Awakowicz, J. Food Prot. **71** (10), 2119 (2008).

4. E. A. Kral'kina, Phys. Usp. **51** (5), 519 (2008).

5. Yu. A. Lebedev, Plasma Sources Sci. Technol. **24**, 1 (2015).

6. H. Conrads and M. Schmidt, Plasma Sources Sci. Technol. **9** (4), 441 (2000).

7. A. S. Saharov, V. A. Ivanov, and M. E. Konyzhev, Prikl. Fiz., No. 6, 99 (2012).

8. D. Leonhardt, S.G. Walton, R.F. Fernsler, Phys. Plasmas **14**, 057103 (2007).

9. G. M. Petrov, D. R. Boris, Tz. B. Petrova, E. H. Lock, R. F. Fernsler, and S. G. Walton, Plasma Sources Sci. Technol. **22**, 065005 (2013).

10. E. H. Lock, R. F. Fernsler, and S. G. Walton, Plasma Sources Sci. Technol. **17** (2), 025009 (2008).

11. E. H. Lock, D. Y. Petrovykh, P. Mack, T. Carney, R. G. White, S. G. Walton, and R. F. Fernsler, Langmuir. **26** (11), 8857 (2010).

12. R. G. Sharafutdinov, A. V. Skrynnikov, A. V. Parakhnevich, B. M. Ayupov, A. M. Badalian, O. V. Polyakov, M. R. Baklanov, K. P. Mogilnikov, and S. A. Biryukov, J. Appl. Phys. **79**, 7274 (1996).

13. R. G. Sharafutdinov, S. Ya. Khmel, V. G. Shchukin, M. V. Ponomarev, E. A. Baranov, A. V. Volkov, O. I. Semenova, L. I. Fedina, P. P. Dobrovolsky, and B. A. Kolesov, Solar Energy Materials & Solar Cells. **89**, 99 (2005).

14. V. L. Bychkov, M. N. Vasil'ev, and A. P. Zuev, High Temperature. **32** (3), 323 (1994).

15. V. A. Burdovitsin, I. Yu. Bakeev, A. A. Zenin, D. B. Zolotukhin, A. V. Kazakov, A. S. Klimov, A. V. Medovnik, E. M. Oks, and A. V. Tyunkov, Proc. TUSUR. **19** (2), 5 (2016).

16. D. B. Zolotukhin, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, Technical Physics. **60** (5), 772 (2015).

17. D. B. Zolotukhin, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, Plasma Sources Sci. Technol. **25** (2), 015001 (2015).

18. G. Shafir, D.B. Zolotukhin, V.A. Godyak, S. Gleizer, Ya. Slutsker, R. Gad, V. Bernshtam, Yu. Ralchenko, and Ya. E. Krasik, Plasma Sources Sci. Technol. **26** (2), 025005 (2017).

19. S. V. Dudin, A. V. Zykov, K. I. Polozhiy, and V. I. Farrenik, Tech. Phys. Lett. **24** (22), 33 (1998).