

## Генерация плазмы при ионизации газа электронными источниками в диапазоне давлений 1–100 Па (обзор)

А. С. Климов, А. А. Зенин, Д. Б. Золотухин, А. В. Тюньков, Ю. Г. Юшков

*В статье приведен обзор последних достижений в области генерации и исследования пучковой плазмы, получаемой при ионизации газа стационарным низкоэнергетичным пучком электронов в форвакуумном диапазоне давлений (1–100 Па). Представлены особенности взаимодействия стационарного электронного пучка с создаваемой им плазмой при его транспортировке в вакуумной камере большого объема, а также результаты исследования параметров плазмы, создаваемой при инжекции электронного пучка в сосуд с диэлектрическими стенками. Показано, что в зависимости от параметров электронного пучка, давления и рода газа возможно создание условий коллективного взаимодействия с зажиганием пучково-плазменного разряда, отличающегося повышенным значением концентрации и температуры плазменных электронов.*

*Ключевые слова:* электронный пучок, средний вакуум, плазма, пучково-плазменный разряд, ленточный и сфокусированный пучки электронов.

**Ссылка:** Климов А. С., Зенин А. А., Золотухин Д. Б., Тюньков А. В., Юшков Ю. Г. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 3. С. 249.

**Reference:** A. S. Klimov, A. A. Zenin, D. B. Zolotukhin, A. V. Tyunkov, and Yu. G. Yushkov, *Usp. Prikl. Fiz.* 7 (3), 249 (2019).

### Введение

Традиционно для получения сильно-неравновесной низкотемпературной плазмы используются разряды различных типов, а именно, тлеющий, дуговой, СВЧ-разряд, а также их комбинации [1–3]. Несмотря на достигнутые успехи в применении такого способа генерации плазмы, имеется и ряд сложностей, связанных с достаточно узким диапазоном

условий, при которых наблюдается устойчивое горение разрядов, трудностью или невозможностью независимой регулировки таких рабочих параметров, как энергия ионов, плотность ионного тока, состав рабочей смеси газов [4]. Возникают сложности и с созданием однородной холодной плазмы большого объема при давлении порядка 10–100 Па и выше [5]. Кроме того, при использовании в качестве плазмообразующих сред газов с высокой химической активностью возникают проблемы, связанные с отравлением электродов продуктами их взаимодействия с плазмой, а также возможным разрушением электродов.

В отличие от газоразрядных генераторов плазмы, использование инжекции электронного пучка в газовую среду и образование пучковой плазмы за счет процессов ионизации атомов и молекул электронами пучка имеет ряд преимуществ. Основные из них заключаются в независимости параметров электронного пучка от рода плазмообразующего газа,

---

Климов Александр Сергеевич, с.н.с., д.т.н.  
Зенин Алексей Александрович, с.н.с., к.т.н.  
Золотухин Денис Борисович, с.н.с., к.ф.-м.н.  
Тюньков Андрей Владимирович, доцент, к.т.н.  
Юшков Юрий Георгиевич, с.н.с., к.т.н.  
Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники.  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
Тел. 8(905) 990-52-41. E-mail: klimov@main.tusur.ru

Статья поступила в редакцию 23 января 2019 г.

© Климов А. С., Зенин А. А., Золотухин Д. Б.,  
Тюньков А. В., Юшков Ю. Г., 2019

возможности распространения электронного пучка и создания им плазмы в достаточно широком диапазоне давлений [6, 7]. Кроме того, электронный пучок может быть инжектирован в плазму, уже предварительно созданную с помощью различного рода разрядов, что расширяет возможности практического применения электронно-пучковой плазмы в операциях модификации материалов за счет одновременного использования двух плазмообразующих факторов. Изменением давления и состава плазмообразующей среды, управлением процессами генерации активных частиц в плазме за счет изменения параметров электронного пучка достигается реализация широкого спектра плазмохимических реакций [8, 9].

Как правило, в установках для создания электронно-пучковой плазмы область генерации электронного пучка и область, где генерируется пучковая плазма, пространственно разделены. Это связано со сложностью обеспечения работоспособности источника электронов при давлениях в единицы и сотни Па, которые обычно устанавливаются в объеме, занимаемом газом. В связи с этим необходимы технические решения, позволяющие проводить мощные электронные пучки из вакуума в газ [6], либо устройства, позволяющие генерировать пучки электронов при давлениях, соответствующих давлению в области занимаемой газом.

Интервал давлений 1–100 Па относится к форвакуумному диапазону, который уже достаточно хорошо освоен т.н. форвакуумными плазменными источниками электронов. Такие источники обычно генерируют непрерывные пучки электронов с энергией от 5 до 30 кэВ и током до 300 мА при давлениях 5–30 Па [10]. Изменение формы эмиссионной границы плазмы позволяет подобным источникам создавать электронные пучки различной конфигурации: узкофокусированные, широкоапертурные и ленточные.

Цель настоящей статьи заключается в представлении краткого обзора достижений в области генерации пучковой плазмы при использовании в качестве генераторов электронного пучка форвакуумных плазменных электронных источников.

## Генерация плазмы большой площади

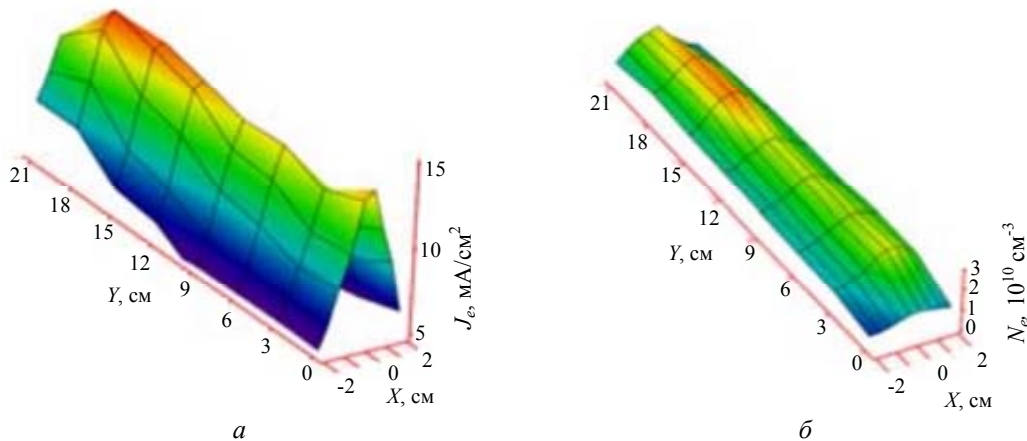
Технологические задачи ионно-плазменной обработки плоских поверхностей большой площади, такие как плазмохимическое и ионное травление и очистка поверхности, синтез защитных и функциональных покрытий за счет реакции разложения и синтеза в плазме [11–13], требуют создания однородной протяженной плазменной структуры малой толщины с площадью десятки квадратных сантиметров. Кроме большой площади плазмы, необходимо также обеспечение ее достаточно высокой концентрации, что требует повышенного рабочего давления.

Следует отметить, что область давлений, относящихся к форвакуумному диапазону 1–100 Па, оптимальна с точки зрения создания плотной плазмы, пригодной для технологических целей. Одним из наиболее перспективных способов формирования плазменного образования большой площади с приемлемым значением концентрации является ионизация газа электронным пучком ленточной конфигурации. Ввиду повышенного газового давления использование электронных источников с термоэмиссионным катодом в качестве генератора ленточного пучка затруднено. Альтернативным решением может служить использование плазменного катода, где в качестве источника электронов выступает плазма газового разряда. Одним из преимуществ плазменного катода, помимо его нечувствительности к составу газовой атмосферы и броскам давления, возникающим при облучении материалов, является возможность варьирования формой поперечного сечения генерируемого электронного пучка за счет изменения формы плазменной эмиссионной границы.

В работе [14] представлены результаты экспериментального исследования пространственного распределения концентрации и температуры электронов пучковой плазмы, создаваемой непрерывным ленточным электронным пучком с энергией до 2 кэВ в аргоне при давлении от 6 до 9 Па. Для генерации электронного пучка ленточной конфигурации использовался плазменный электронный источник на основе разряда низкого давления с протяженным полым катодом [15]. Электрон-

ный пучок, формируемый плазменным источником такого типа, имел непосредственно на выходе из эмиссионной щели сечение  $10 \times 250$  мм. При распространении в среде аргона пучок создавал плазму, для удержания которой в области распространения электрон-

ного пучка создавалась продольное магнитное поле. В данной работе показано, что распределение концентрации и температуры электронов напрямую зависит от соответствующего распределения плотности тока по сечению пучка (см. рис. 1).



**Рис. 1.** Распределение плотности пучка (а) и плотности (б) плазмы в плоскости  $XY$ , перпендикулярной направлению распространения пучка; давление 6 Па [15].

Кроме того, согласно данным этой работы, на параметры пучковой плазмы существенное влияние оказывает величина давления в вакуумной камере, а именно, с ростом давления концентрация пучковой плазмы увеличивается. Аналогичный рост имеет место и при увеличении тока пучка. Напряженность магнитного поля влияет на ширину «плазменного листа» в поперечном сечении. Увеличение напряженности приводит к уменьшению ширины плазмы в поперечном сечении с одновременным повышением ее концентрации в средней плоскости пучка.

В работе [16] представлены параметры пучковой плазмы, формируемой форвакуумным плазменным источником ленточного электронного пучка с энергией 2 кэВ в условиях его транспортировки без сопровождающего магнитного поля при давлении 5–10 Па. Модернизация плазменного электронного источника позволила получить пучок с низкой расходимостью (рис. 2, а) и использовать его для генерации пучковой плазмы. Поперечные размеры пучка на выходе его из электронного источника  $10 \times 1$  см<sup>2</sup>, протяженность участка транспортировки – расстояние до коллектора 50 см. Как указывают авторы работы [16], в отличие от генерации плазмы в присутствии

магнитного поля, в данном случае возможны два режима пучково-плазменного взаимодействия. При относительно малых токах (150–200 мА) пучка распространение электронного пучка в области транспортировки характеризуется низким значением концентрации пучковой плазмы (порядка  $5 \times 10^{15}$  м<sup>-3</sup>) и температуры электронов (0,5 эВ) рис. 2, б область I.

Повышение тока пучка в два раза приводит к существенному увеличению концентрации и температуры электронов плазмы до  $1,5 \times 10^{16}$  м<sup>-3</sup> и 2 эВ (область II) соответственно. Повышение концентрации сопровождается также усилением интенсивности свечения плазмы. Указанные результаты, а также смещение максимума энергии электронов пучка в область более низких энергий указывают на зажигание пучково-плазменного разряда при взаимодействии электронного пучка и созданной им плазмы. В формируемом при этом плазменном образовании типа «плазменный лист» концентрация плазмы и температура электронов составляют  $\sim 10^{16}$  м<sup>-3</sup> и 1–2,5 эВ соответственно. Достигнутые значения параметров и размеров плазмы позволяют использовать ее в технологиях поверхностной модификации различных изделий плоских протяженных форм.

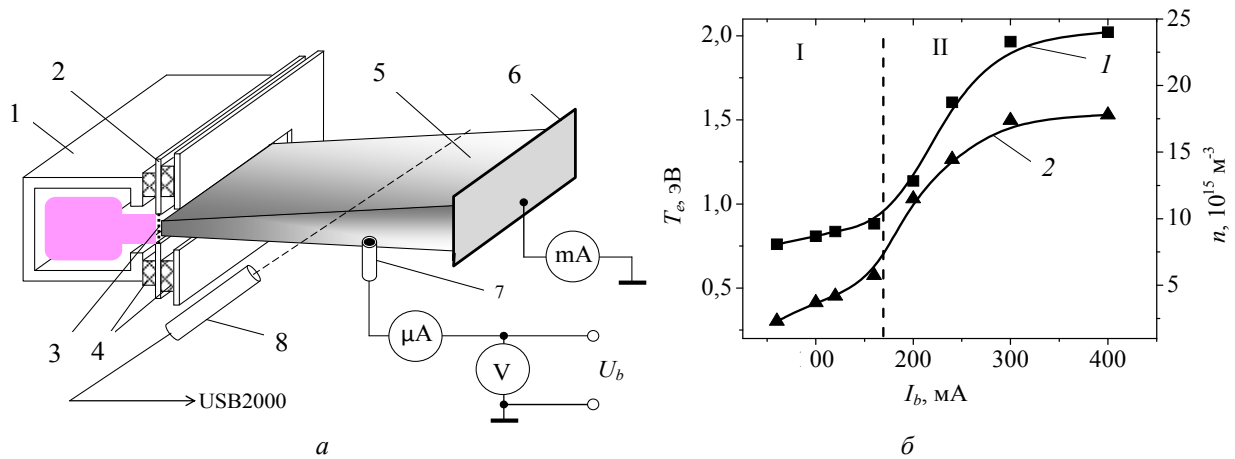


Рис. 2. Модернизированный плазменный электронный источник [16]. а) – Схема экспериментальной установки: 1 – протяженный полый катод; 2 – анод; 3 – экстрактор; 4 – изоляторы; 5 – электронный пучок; 6 – коллектор; 7 – одиночный зонд; 8 – спектрометр; поперечный размер пучка  $10 \times 1 \text{ см}^2$ , длина образованной пучковой плазмы 40 см. б) – Зависимость температуры электронов (кривая 1) и концентрации пучковой плазмы (кривая 2) от тока пучка. Давление 7 Па.

### Генерация плазмы сфокусированным электронным пучком

Электронно-пучковая плазма, обладающая, как уже сказано, рядом преимуществ перед плазмой, получаемой с помощью различных разрядов, в некоторых случаях может оказывать негативное воздействие на распространение электронного пучка. Интенсивная передача энергии электронов пучка плазменным электронам в результате усиления ленгмюровских колебаний может приводить к образованию пучковой неустойчивости и сопровождаться значительными потерями

мощности пучка, а также его расфокусировке.

В работе [17] представлены результаты исследования формирования сфокусированного электронного пучка при отборе электронов из плазмы стационарного разряда с полым катодом в форвакуумной области давлений. На основании измерений энергетического спектра и диаметра электронного пучка (рис. 3), а также параметров и спектров излучения плазмы, возникающей при взаимодействии пучка с газом, сделан вывод о возникновении пучково-плазменного разряда, вызывающего ухудшение условий фокусировки пучка.

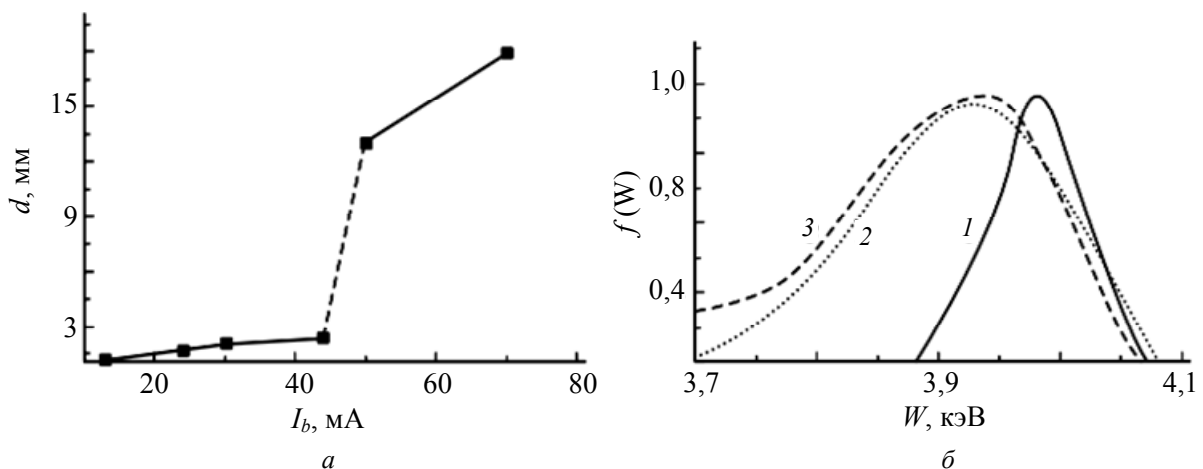


Рис. 3. Формирование сфокусированного электронного пучка при отборе электронов из плазмы стационарного разряда с полым катодом [17]: а) – зависимость диаметра пучка от его тока; б) – функция распределения электронов по энергии для различных значений тока пучка: кривая 1 – 30, кр. 2 – 42, кр. 3 – 64 мА (ускоряющее напряжение 4 кВ, давление 3 Па).

Минимальная плотность тока в пучке, при которой появляется пучково-плазменный разряд, возрастает как с подъемом ускоряющего напряжения, так и с увеличением давления газа, что отражено на рис. 4.

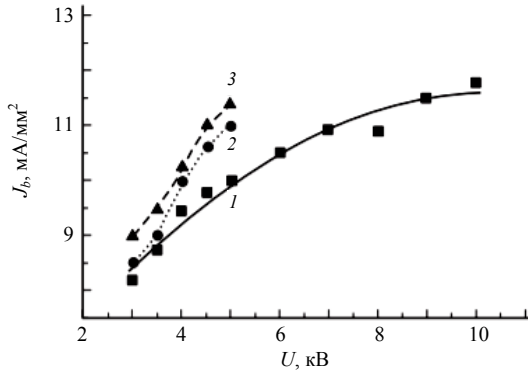


Рис. 4. Пороговая плотность тока электронного пучка как функция ускоряющего напряжения для различных давлений газа, кривая 1 – 2 Па, кр. 2 – 3 Па, кр. 3 – 4 Па [17].

В работе [18] приведены результаты измерения параметров пучковой плазмы, образованной при распространении сфокусированного цилиндрического электронного пучка с энергией до 14 кэВ и током в пучке до 300 мА

в вакуумной камере в атмосфере гелия. Рабочее давление в экспериментах составляло 40 Па. Схема установки и распределение концентрации плазмы вдоль пучка приведены на рис. 5.

Показано, что положением области интенсивного взаимодействия электронного пучка и плазмы можно управлять плотностью тока пучка. Изменение плотности тока достигается изменением положения кроссовера пучка. В случае отсутствия кроссовера, т. е. когда электроны пучка движутся по практически параллельным траекториям до коллектора, концентрация плазменных электронов слабо изменяется вдоль пути распространения пучка. При изменении параметров фокусировки пучка и расположении кроссовера вблизи коллектора (на расстоянии порядка 2 сантиметров), посередине между коллектором и источником электронов, либо вблизи источника электронов в соответствующей области наблюдается максимум распределения концентрации плазменных электронов. Примечательно, что в этой области концентрация плазмы возрастает в три раза и более по сравнению со случаем распространения однородного пучка без кроссовера (рис. 5, б).

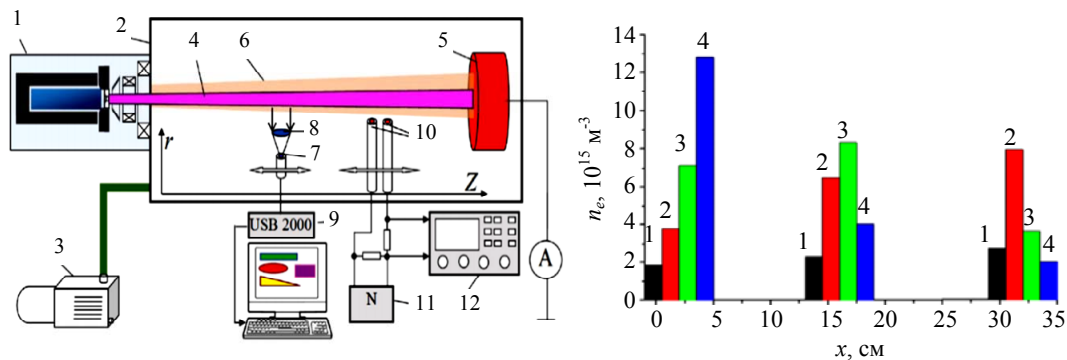


Рис. 5. Экспериментальная установка и параметры пучковой плазмы [18]. а) – Схема установки: 1 – плазменный источник электронов, 2 – вакуумная камера, 3 – форвакуумный насос, 4 – электронный пучок, 5 – коллектор, 6 – пучковая плазма, 7 – собирающая линза, 8 – приемная часть спектрометра, 9 – оптический спектрометр с компьютером, 10 – двойной лэнгмюровский зонд, 11 – генератор пилообразного напряжения, 12 – осциллограф. б) – Распределение концентрации вдоль пучка для ускоряющего напряжения 14 кВ для различных расположений кроссовера пучка: 1 – без кроссовера, 2 – кроссовер вблизи коллектора, 3 – кроссовер в центральной части участка транспортировки пучка, 4 – кроссовер вблизи источника электронов.

Кроме того, в этой же работе показан еще один эффект, связанный с взаимодействием пучка электронов и плазмы: образование чередующихся ярких и темных областей в свечении пучковой плазмы (см. рис. 6). Чередующиеся области наблюдались вдоль оси пучка

в достаточно узком диапазоне параметров пучка, а именно, при токе пучка, близком к 200 мА, в диапазоне ускоряющих напряжений 8–14 кВ и при положении кроссовера пучка на расстоянии 5–7 сантиметров от коллектора (рис. 6, б).

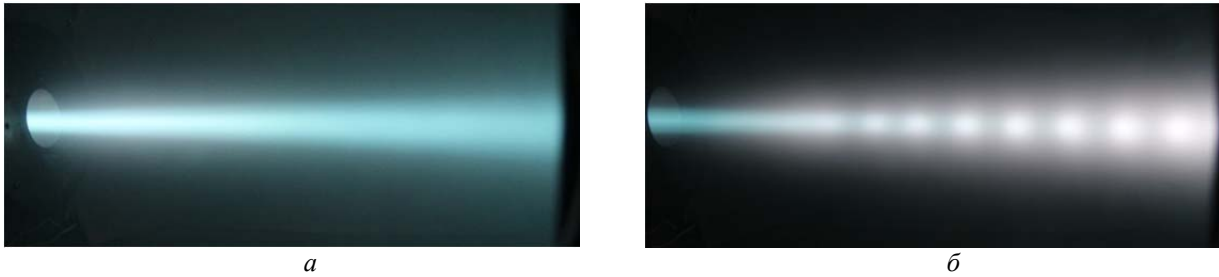


Рис. 6. Фотография свечения пучковой плазмы гелия в отсутствие (а) и при наличии (б) чередующихся областей. Ток пучка: а – 180 мА, б – 200 мА. Ускоряющее напряжение 10 кВ, давление 40 Па [18].

Наблюдаемое явление напоминает страты, т. е. неподвижные или движущиеся зоны неравномерной светимости, регулярно чередующиеся с тёмными промежутками в положительном столбе газового разряда низкого давления [19, 20]. Как указывают авторы работы [18], подобно стратам, наблюдаемое чередование светлых и темных областей существует в очень ограниченном диапазоне токов пучка и энергий электронов и, по-видимому, связано с возникновением пучковой неустойчивости.

### Пучковая плазма, создаваемая инъекцией пучка в диэлектрический объем

Высоковакуумная инъекция электронного пучка в диэлектрическую трубу возможна лишь при условии удаления приносимого пучком отрицательного заряда [21]. Инъекция пучка в диэлектрическую полость в высоком вакууме вовсе невозможна ввиду сильной зарядки внутренней поверхности диэлектриче-

ского объема, вызывающей отклонение, рассыпание и торможение электронного пучка.

Однако упомянутое физическое ограничение может быть преодолено при использовании форвакуумных плазменных источников электронов, работающих при давлении газа 1–100 Па. Впервые возможность генерации пучковой плазмы в полностью диэлектрическом объеме показана в работе [22], в которой измерены параметры пучковой плазмы, образованной при инъекции электронного пучка внутрь цилиндрической тонкостенной кварцевой колбы внутренним диаметром 4 см и длиной 20 см (см. рис. 7). Внутри располагался коллектор, подключенный к высокоомному вольтметру для измерения потенциала на дне полости. Экспериментальные исследования параметров созданной пучковой плазмы показали, что потенциал плазмы внутри сосуда отрицателен и повышается с ростом давления, а концентрация пучковой плазмы в сосуде оказалась выше концентрации плазмы, созданной пучком в свободном пространстве.

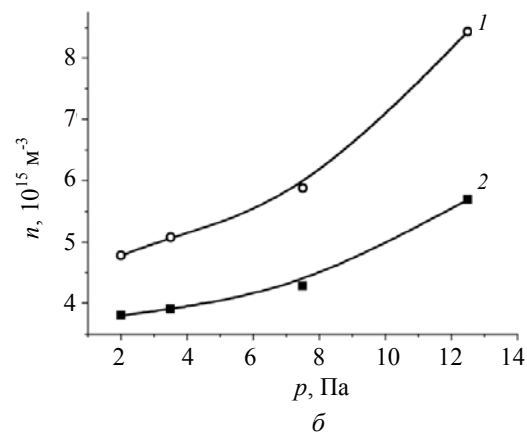
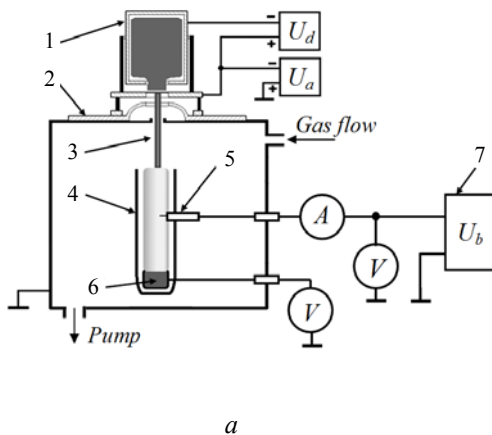
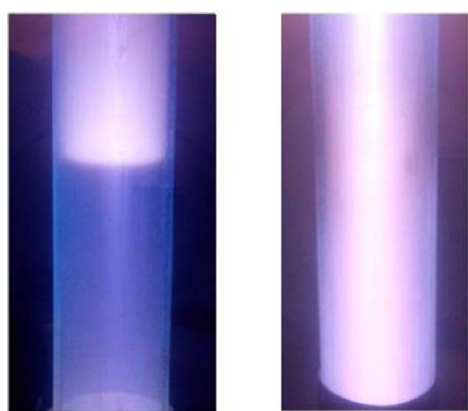


Рис. 7. Генерации пучковой плазмы в полностью диэлектрическом объеме [22]. а) – Схема экспериментальной установки для генерации пучковой плазмы в диэлектрической полости: 1 – плазменный источник электронов, 2 – вакуумная камера, 3 – электронный пучок, 4 – кварцевая колба, 5 – одиночный зонд, 6 – коллектор, 7 – источник напряжения смещения. б) – Зависимость концентрации плазмы от давления газа: 1 – пучок инжектируется в колбу, 2 – распространяется свободно в вакуумной камере. Энергия пучка 3 кэВ, ток пучка 20 мА, воздух.

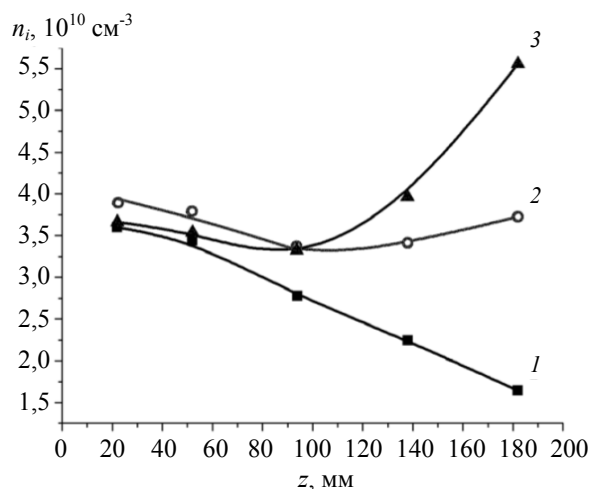
Более поздние работы [22, 23] показали, что существуют режимы, при которых плазма занимает весь объем полости и при отсутствии внутри каких-либо электродов для вывода электрического заряда изнутри. Замыкание тока в этом случае осуществляется обратным потоком вторичных электронов с поверхности полости, а также и через пучковую плазму на заземленные участки вакуумной камеры.

В работе [23] установлено, что существуют такие режимы генерации плазмы (главным

образом, при пониженных давлениях газа и повышенных энергиях пучка), при которых плазма занимает диэлектрический объем лишь частично (рис. 8, а). С повышением давления газа плазма заполняет весь объем (рис. 8, б). Кроме того впервые показано, что вариация давления газа и энергии инжектируемого в полость пучка приводит к изменению характера продольного распределения концентрации плазмы. При оптимальных параметрах неоднородность концентрации может быть снижена до величины около 10 %.



а



б

Рис. 8. Свечение плазмы [23], созданной в диэлектрической полости, при энергии пучка 7 кэВ и токе пучка 20 мА для давления воздуха: а) – 1,5 Па, б) – 4 Па. в) – Продольное распределение концентрации плазмы в полости при давлении воздуха 5 Па и токе пучка 20 мА для энергии пучка 2 кэВ (кривая 1), 5 кэВ (2) и 8 кэВ (3).

Объяснение повышенной концентрации дано на основе разработанной численной модели [23, 24], в которой приводится численная балансовая модель, объясняющая повышенную концентрацию и температуру электронов пучковой плазмы в диэлектрической полости дополнительным энергетическим вкладом вторичных электронов, выбиваемых электронами пучка и ионами плазмы из внутренней поверхности полости и ускоренными в пристеночных и придонных слоях. Показано, что вклад вторичных электронов в ионизацию резко увеличивается в области низких давлений газа, в то время как вклад плазменных электронов остается пренебрежимо малым (рис. 9, а).

В статье [24] представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования, демонстрирующие влияние материала дна на параметры плазмы в диэлек-

трической полости (рис. 9, б). Результаты показывают, что обнаруженные ранее (рис. 8, в) особенности продольной неоднородности плазмы могут быть объяснены суперпозицией двух эффектов: деградацией пучка из-за его взаимодействия с газом и вкладом в ионизацию вторичных электронов, ускоренных в придонном слое, причем материал дна напрямую влияет как на величину придонного падения потенциала, так и, соответственно, на параметры пучковой плазмы (рис. 9, б). При низких коэффициентах вторично-электронной эмиссии вклад вторичных электронов в повышение параметров плазмы невелик из-за малого тока вторичных электронов, а при слишком высоких – из-за чрезвычайно эффективной нейтрализации зарядки дна полости, резко снижающей придонную разность потенциалов и, соответственно, энергию вторичных электронов.

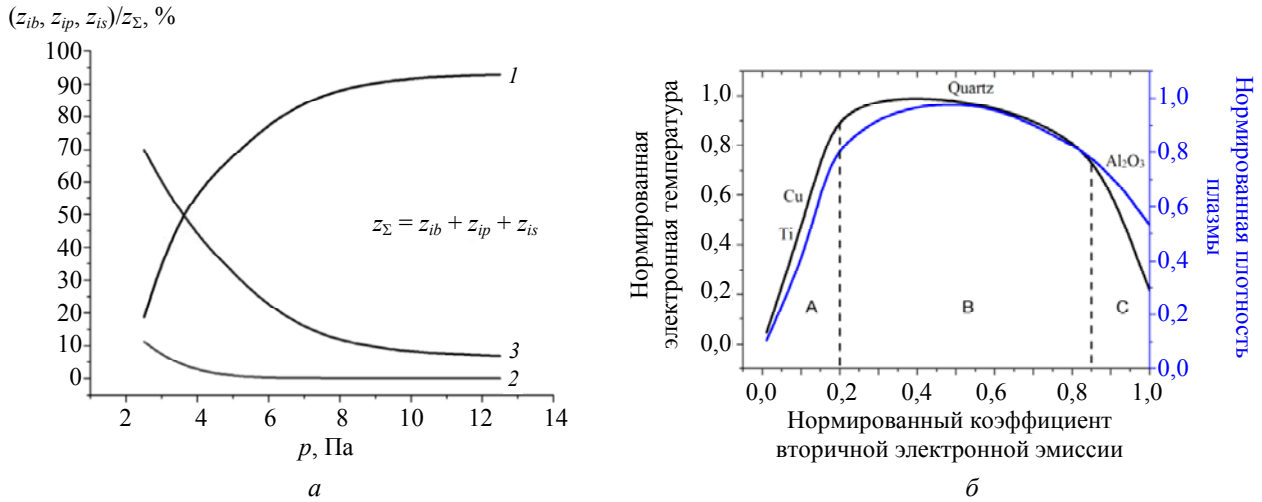


Рис. 9. Численная модель. а) – Смоделированные нормированные выходы ионизации пучковых (1), плазменных (2), выбитых из дна полости вторичных (3) электронов при генерации плазмы в кварцевой полости в зависимости от давления азота, для тока пучка 20 мА и энергии пучка 3 кэВ [23]. б) – Смоделированные зависимости нормированных параметров плазмы как функции нормированного коэффициента вторично-электронной эмиссии при токе пучка 6 мА, энергии пучка 6 кэВ и давлении азота 2,5 Па, с отмеченными на графике приблизительными значениями коэффициентов материалов (титан, медь, корунд) пластин, размещенных на дне полости [24].

Известно, что эффективность использования энергии пучка на генерацию плазмы может быть значительно повышена в случае, если созданы условия для пучково-плазменного разряда (ППР), способствующего интенсивной диссипации энергии пучка на раскачку ленгмюровских колебаний. Это в полной мере относится и к случаю генерации пучковой плазмы в диэлектрической полости с одновременным возбуждением ППР. В работе [25] описан эксперимент по генерации пучково-

плазменного разряда при инъекции непрерывного пучка электронов с энергией 3 кэВ и током 10–55 мА в кварцевую цилиндрическую полость длиной 20 см и диаметром 8 см при давлении газа 4–5 Па. Продемонстрировано существование двух режимов генерации плазмы в полости, а именно, или с преобладанием парных столкновений, или коллективного пучково-плазменного взаимодействия (режим ППР) (см. рис. 10).

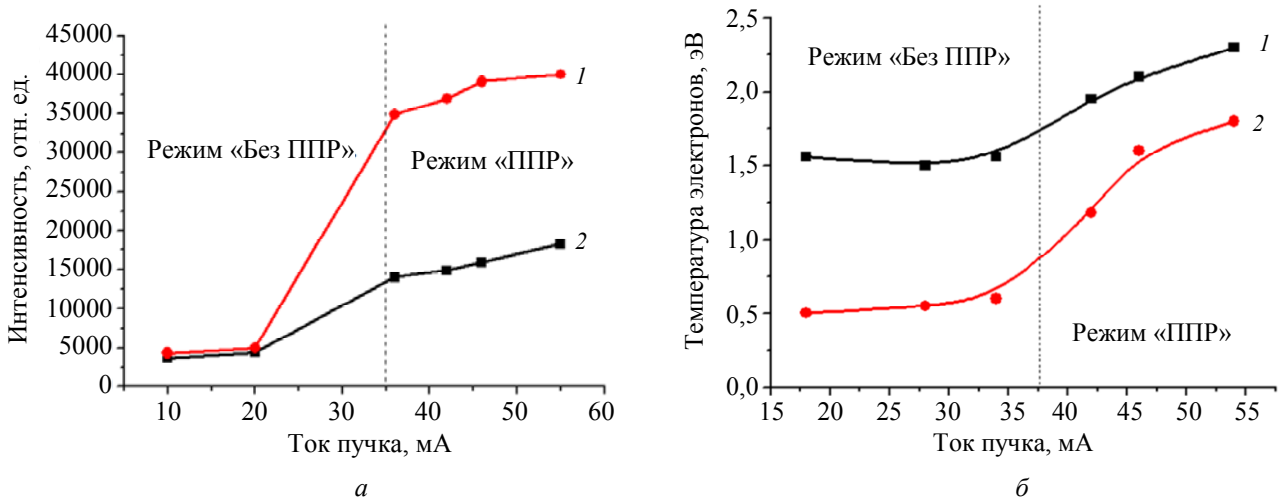


Рис. 10. Результаты эксперимента в [25]: а) – интегральная интенсивность спектральных линий в зависимости от тока пучка при генерации плазмы в свободном пространстве (кривая 1) и внутри диэлектрической полости (кривая 2); б) – температура электронов пучковой плазмы, создаваемой в открытом пространстве (кривая 1) и в диэлектрической полости (кривая 2) пучком энергией 3 кэВ при давлении азота 4 Па



В режиме ППР интегральная интенсивность свечения частиц плазмы в диапазоне 200–800 нм многократно выше в случае, если плазма создается в полости при прочих равных параметрах эксперимента (см. рис. 10, *а*). Измерения параметров плазмы в полости в этих двух режимах показали, что наивысшая концентрация плазмы и температура электронов в полости достигается именно в режиме ППР (рис. 10, *б*), вследствие, вероятнее всего, более интенсивной передачи энергии от пучка в плазму.

Актуальность генерации пучковой плазмы в диэлектрических полостях с применением форвакуумных плазменных источников электронов не ограничивается только умозрительным интересом. В работе [26] показана возможность успешной пучково-плазменной стерилизации стеклянных и пластиковых медицинских флаконов объемом 10 и 60 мл, что отражено на рис. 11.

Относительно невысокие параметры пучка (ток эмиссии до 50 мА, энергия 3 кэВ), пе-

риодическое воздействие на сосуд (несколько десятков сеансов по 5–10 секунд активного облучения) обеспечивали не только отсутствие тепловых повреждений сосудов, но и существование режимов облучения, способствующих полной стерилизации сосуда от тестовой культуры микроорганизмов (кишечной палочки). Таким образом, эти результаты свидетельствуют о возможности пучково-плазменной стерилизации диэлектрических сосудов без использования токсичных газов или других химикатов и чрезвычайно высокого нагрева. Зависимость степени стерилизации от плотности энергии, вводимой в сосуд (рис. 11, *б*), свидетельствует о существовании режимов эффективной стерилизации стеклянных и термочувствительных пластиковых контейнеров без их повреждений. Однако следует отметить, что для понимания механизма воздействия пучка и плазмы на микроорганизмы в этих условиях требуются дальнейшие эксперименты.

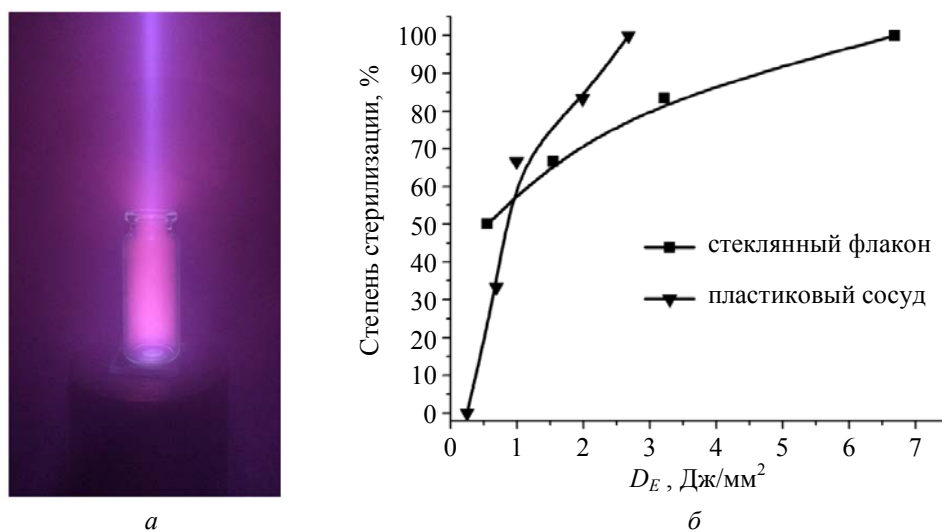


Рис. 11. Пучково-плазменная стерилизация [26]: *а*) – стеклянного медицинского флакона объемом 10 мл; *б*) – доля стерильных образцов как функция дозы (плотности) энергии пучка, инъецированного в стеклянный или пластиковый сосуд

### Заключение

Представленный в работе обзор посвящен описанию основных параметров пучковой плазмы, создаваемой при распространении электронных пучков с энергией до 15 кВ, и током до 300 мА в газовой среде при давлении в единицы и десятки Па. Приведены схемы

установок для генерации пучковой плазмы различной площади, отмечены преимущества и недостатки взаимодействия электронного пучка с создаваемой этим пучком плазмой. Определены режимы генерации пучково-плазменного разряда, позволяющего получать пучковую плазму с высокой концентрацией и температурой плазменных электронов, что

может быть использовано в эффективных плазмохимических технологиях.

*Работа поддержана Министерством образования и науки в рамках базовой части проекта № 3.9605.2017/8.9.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лопатин И. В., Ахмадеев Ю. Х., Коваль Н. Н., Щанин П. М. // ПТЭ. 2011. № 1. С. 151.
2. Щанин П. М., Коваль Н. Н., Ахмадеев Ю. Х., Григорьев С. В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 5. С. 24.
3. Lebedev Yu. A. // Plasma Sources Science and Technology. 2015. Vol. 24 (5). P. 053001.
4. Берлин Е. В., Коваль Н. Н., Сейдман Л. А. Плазменная химико-термическая обработки поверхности стальных деталей. – М.: Техносфера, 2012.
5. Akhmadeev Y. H., Denisov V. V., Koval N. N., Kovalsky S. S., Lopatin I. V., Schanin P. M., Yakovlev V. V. // Plasma Physics Reports. 2017. Vol. 43 (1). P. 67.
6. Васильев М. Н. Применение электронно-пучковой плазмы в плазмохимии // Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В. Е. Фортова. Т. XI. – М.: Наука, 2001. С. 436–445.
7. Бычков В. Л., Васильев М. Н., Коротеев А. С. Электронно-пучковая плазма. Генерация, свойства, применение. – М.: МГОУ, 1993.
8. National Research Council. Plasma Processing of Materials: Scientific Opportunities and Technological Challenges. (National Academy Press. Washington, D.C., 1991).
9. National Research Council. Database Needs for Modelling and Simulation of Plasma Processing. (National Academy Press. Washington, D.C., 1996).
10. Bakeev I. Yu., Klimov A. S., Oks E. M., Zenin A. A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27. P. 075002.
11. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. – М.: Радио и связь, 1986.
12. Walton S., Leonhardt D., Murphy D., Meger R., Fernsler R. // Bull. Am. Phys. Soc. 1999. Vol. 44. No. 8. P. 58.
13. Leonhardt D., Muratore C., Walton S. G. // IEEE T. Plasma Sci. 2005. Vol. 33. No. 2. P. 783.
14. Бурдовицин В. А., Окс Е. М., Федоров М. В. // Известия ВУЗов. Физика. 2004. № 3. С. 74.
15. Бурдовицин В. А., Бурачевский Ю. А., Окс Е. М., Федоров М. В. // ПТЭ. 2003. № 2. С. 1.
16. Климов А. С., Окс Е. М., Зенин А. А. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. № 9. С. 37.
17. Журков И. С., Бурдовицин В. А., Окс Е. М., Осипов И. В. // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. № 6. С. 106.
18. Klimov A. S., Zenin A. A., Oks E. M., Prech K. // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25 (11). P. 113103.
19. Pillai S. D., Shayanfar S. // Radiation Physics and Chemistry. 2018. Vol. 143. P. 85.
20. Frank N. W. // Radiation Physics and Chemistry. 1995. Vol. 45 (6). P. 989.
21. Dunn D. A., Nichparenko W., Simpson J. E., Thomassen K. I. // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. No. 10. P. 3273.
22. Золотухин Д. Б., Бурдовицин В. А., Окс Е. М. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 5. С. 142.
23. Zolotukhin D. B., Burdovitsin V. A., Oks E. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. Vol. 25. No. 1. P. 015001.
24. Zolotukhin D. B., Burdovitsin V. A., Oks E. M. // Physics of Plasmas. 2017. Vol. 24. No. 9. P. 093502.
25. Золотухин Д. Б., Юшков Ю. Г., Тюнков А. В. / Материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск. 2018). С. 210–212.
26. Zolotukhin D., Burdovitsin V., Oks E., Tyunkov A., Yushkov Yu. // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 652. No. 1. P. 1.

PACS: 52.59.-f, 52.35.-g

## Plasma generation with electron sources at the medium gas pressures (a review)

*A. S. Klimov, A. A. Zenin, D. B. Zolotukhin, A. V. Tyunkov, and Yu. G. Yushkov*

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: klimov@main.tusur.ru

*Received January 23, 2019*

*The article presents an overview of the latest achievements in the field of generation and study of the beam plasma obtained during gas ionization by a low-energy electron beam in*

***the range of medium vacuum pressures. The features of interaction of the electron beam with the plasma produced by it during its transportation in a vacuum chamber of a large volume, and the results of the study of the parameters of the plasma produced by the injection of the electron beam into a vessel with dielectric walls are presented. It is shown that depending on the parameters of the electron beam, as well as the pressure and gas type, it is possible to create conditions for collective interaction with the ignition of the beam-plasma discharge, characterized by an increased concentration and temperature of plasma electrons.***

**Keywords:** electron beam, medium vacuum, plasma, beam plasma discharge, ribbon and focused electron beams.

## REFERENCES

1. I. V. Lopatin, Yu. K. Akhmadeev, N. N. Koval, and P. M. Shchanin, *Instrum. Exp. Tech.* **54**, 141 (2011).
2. P. M. Schanin, N. N. Koval, Yu. Kh. Akhmadeev, and S. V. Grigoriev, *Technical Physics.* **49**, 545 (2004).
3. Yu. A. Lebedev, *Plasma Sources Sci. T.* **24**, 053001 (2015).
4. E. V. Berlin, N. N. Koval', and L. A. Sejdman, *Plasma Treatment of Steel Surfaces* (Moscow, Tekhnosfera, 2012) [in Russian].
5. Y. H. Akhmadeev, V. V. Denisov, N. N. Koval, S. S. Kovalsky, I. V. Lopatin, P. M. Schanin, and V. V. Yakovlev, *Plasma Phys Rep.* **43** (1), 67 (2017).
6. M. N. Vasil'ev, *Application of Electron-Beam Plasma in Plasmochemistry. In Encyclopedia of Low-temperature Plasma.* Ed. by V.E. Fortov. Vol. XI. P. 436–445. (Moscow, Nauka, 2001) [in Russian].
7. V. L. Bychkov, M. N. Vasil'ev, and A. S. Koroteev, *Electron-Beam Plasma.* (Moscow, MGOU, 1993) [in Russian].
8. *National Research Council. Plasma Processing of Materials: Scientific Oportunities and Technological Challenges.* (National Academy Press. Washington, D.C., 1991).
9. *National Research Council. Database Needs for Modelling and Simulation of Plasma Processing.* (National Academy Press. Washington, D.C., 1996).
10. I. Yu. Bakeev, A. S. Klimov, E. M. Oks, and A. A. Zenin, *Plasma Sources Sci. T.* **27**, 075002 (2018).
11. G. F. Ivanovskij and V. I. Petrov, *Ion-Plasma Treatment of Materials* (Moscow, Radio i Svyaz', 1986) [in Russian].
12. S. Walton, D. Leonhardt, D. Murphy, R. Meger, and R. Fernsler, *Bull. Am. Phys. Soc.* **44** (8), 58 (1999).
13. D. Leonhardt, C. Muratore, and S. G. Walton, *IEEE T. Plasma Sci.* **33**, 783 (2005).
14. V. A. Burdovitsin, E. M. Oks, and M. V. Fedorov, *Russian Physics Journal* **47**, 310 (2004).
15. V. A. Burdovitsin, Yu. A. Burachevskii, E. M. Oks, and M. V. Fedorov, *Instrum Exp Tech.* **46** (2), 257 (2003).
16. A. S. Klimov, E. M. Oks, and A. A. Zenin, *Russian Physics Journal* **60** (9), 1501 (2018).
17. I. S. Zhirkov, V. A. Burdovitsin, E. M. Oks, and I. V. Osi-pov, *Technical Physics* **51** (6), 786 (2006).
18. A. S. Klimov, A. A. Zenin, E. M. Oks, and K. Prech, *Phys. Plasmas* **25** (11), 113103 (2018).
19. S. D. Pillai and S. Shayanfar, *Radiat Phys Chem.* **143**, 85 (2018).
20. N. W. Frank, *Radiat Phys. Chem.* **45** (6), 989 (1995).
21. D. A. Dunn, W. Nichparenko, J. E. Simpson, and K. I. Thomassen, *J. Appl. Phys.* **36** (10), 3273 (1965).
22. D. B. Zolotukhin, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, *Technical Physics* **60** (5), 772 (2015).
23. D. B. Zolotukhin, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** (1), 015001 (2016).
24. D. B. Zolotukhin, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, *Physics of Plasmas* **24** (9), 093502 (2017).
25. D. B. Zolotukhin, Yu. G. Yushkov, and A. V. Tyunkov, in *Proceedings of the XIV International scientific and practical conference* (Tomsk, 2018), pp. 210–212.
26. D. Zolotukhin, V. Burdovitsin, E. Oks, and A. Tyunkov, Yu. Yushkov, *Journal of Physics: Conference Series* **652** (1), 1 (2015).