

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9:537.52

ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ КРУПНОМАСШТАБНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

© 2019 г. А. В. Стриковский^а, С. В. Коробков^а, М. Е. Гущин^а,
А. А. Евтушенко^{а,*}, И. Ю. Зудин^а

^а Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

*e-mail: a_evtushenko@inbox.ru

Поступила в редакцию 17.09.2018 г.

После доработки 17.12.2018 г.

Принята к публикации 20.12.2018 г.

Стенд “Спрайт” позволяет зажигать импульсный высоковольтный разряд с размерами порядка одного метра, изолированный от металлических стенок камеры, как в однородном газе, так и в газе с протяженным градиентом давления. Для диагностики плазмы разряда используются СВЧ-интерферометр, магнитный зонд, фотосъемка. Установлено, что в диапазоне давлений от 0.05 до 1 Торр поперечный профиль свечения разряда в его диффузной форме близок к профилю тока. Концентрация плазмы в диффузном разряде достигает 10^{12} см^{-3} , при этом результаты интерферометрических измерений соответствуют значениям, восстановленным из измерений плотности тока в приближении установившегося дрейфа электронов. Полученная диагностическая информация необходима для лабораторного моделирования высотных разрядов в атмосфере Земли.

DOI: 10.1134/S0367292119060106

1. ВВЕДЕНИЕ

Лабораторное моделирование естественных разрядных явлений необходимо для верификации разрабатываемых моделей и качественной интерпретации протекающих в ионизированном газе процессов. Высотные электрические разряды, спрайты [1] и джеты [2], открыты сравнительно недавно, и являются весьма специфическими объектами, в первую очередь, за счет наличия сильного, приблизительно на два порядка величины, перепада давления в области ионизации. Предполагается, что естественный градиент давления определяет неоднородную структуру таких разрядов по высоте, их динамику и зависимость параметров от внешних условий. Для наблюдения высотных разрядов используются оптические и электромагнитные измерения с земли, на самолетах и на спутниках. К сожалению, проведение прямых измерений сопряжено с трудностями в силу неопределенности времени и места разрядов. Поэтому такие вопросы, как инициирование разряда, динамика электрического поля внутри разряда, его воздействие на состав атмосферы остаются до конца не решенными [3]. Конечно, полное количественное моделирование такого существенно нелинейного явления, как электрический разряд, на лабораторном масштабе едва ли возможно, особенно в конфигурациях,

характерных для мезосферы. В то же время, при надлежащем выборе параметров лабораторное моделирование позволяет воспроизвести структурные особенности высотных разрядов, а, в перспективе, и их динамические характеристики, включая эволюцию электромагнитного поля и токов.

Моделирование спрайтов или джетов сопряжено с решением целого ряда научно-технических проблем и выполнением весьма противоречивых требований. Недавно в ИПФ РАН был создан стенд “Спрайт”, позволяющий создавать протяженные градиенты давления воздуха на масштабе порядка одного метра и формировать неоднородную структуру ионизации, типичную для высотных разрядов [4]. При этом для сопоставления результатов лабораторного эксперимента с натурными данными и построения моделей необходима надежная диагностика параметров плазмы разряда.

Чтобы свести к минимуму возмущения, вносимые в разряд, и обеспечить развязку измерительной цепи с высоковольтной цепью разряда, желательно использовать бесконтактные средства диагностики. Данная работа посвящена измерениям параметров импульсного высоковольтного разряда в воздухе методами СВЧ-интерферометрии и магнитных зондов. Представленные

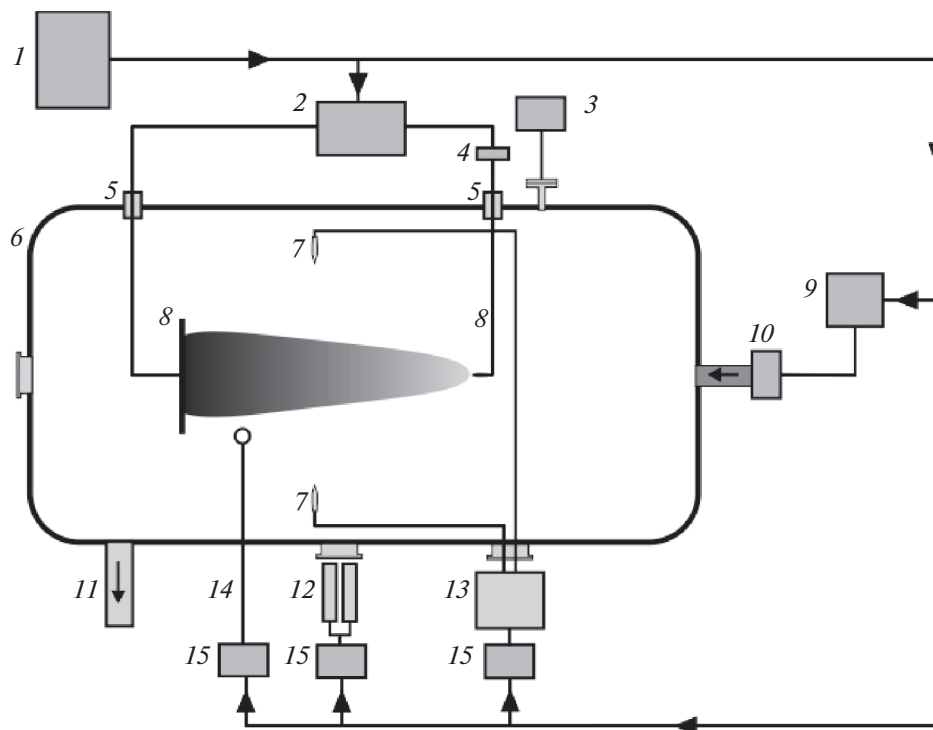


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — генератор задержанных импульсов, 2 — модулятор, 3 — стационарный датчик давления, 4 — пояс Роговского, 5 — высоковольтные вакуумно-плотные вводы, 6 — вакуумная камера, 7 — излучающая и приемная антенны интерферометра, 8 — разрядные электроды, 9 — блок управления клапана напуска, 10 — импульсный газовый клапан, 11 — система откачки, 12 — средства оптической диагностики, 13 — микроволновый интерферометр, 14 — магнитный зонд, 15 — цифровой осциллограф.

результаты получены, в основном, при однородном распределении газа в камере, без градиента давления. Статья нацелена, во-первых, на сопоставление картины свечения разряда с прямыми измерениями профиля тока в тех же сечениях, а во-вторых, на сравнение значений концентрации плазмы, получаемых из измерений разрядного тока, с интерферометрическими измерениями.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Стенд “Спрайт”

Стенд “Спрайт” представляет собой металлическую камеру длиной 2 м и диаметром 1.6 м, оснащенную системой форвакуумной и высоковакуумной откачки, системой импульсного напуска рабочего газа, импульсным источником высокого напряжения и диагностической аппаратурой (рис. 1). Подробное описание установки содержится в работе [5]. Разряд зажигается между двумя электродами, один из которых стержень из нержавеющей стали диаметром 1.2 см с острием, ориентированным вдоль оси камеры, второй — металлический диск диаметром 40 см, установленный перпендикулярно оси камеры напротив

острия стержневого электрода. Электроды закреплены на трубчатых изоляторах длиной 80 см и находятся на максимально возможном удалении от стенок. Электрическая цепь разряда “подвешена”: подключение высоковольтной системы к сети производится через разделительный трансформатор; конденсаторная батарея, тиратронные ключи и электроды гальванически развязаны с корпусом установки, что позволяет локализовать разряд между электродами и минимизировать утечку разрядного тока по металлической камере на землю. В условиях описываемых экспериментов величина высокого напряжения, прикладываемого между электродами, достигала 8 кВ, при этом разрядный ток составлял 1.5 кА. Длительность импульса тока зависела от давления газа в камере, и не превышала 30–40 мкс. Эксперименты проводились при обеих полярностях напряжения, приложенного к промежутку: в режиме отрицательного разряда, при отрицательном потенциале стержневого электрода, и в режиме положительного разряда, при положительном потенциале стержневого электрода.

Контроль давления газа в камере осуществлялся стационарным широкодиапазонным датчиком вакуума Pfeiffer PKR251 с активным блоком

управления RVC300. Для измерения импульсных газовых потоков, формирующих продольный градиент давления в межэлектродном промежутке, использовался манометрический преобразователь с иридиевым катодом марки ПМИ-10-2 по методике, подробно описанной в [6]. Импульсный разрядный ток измерялся поясом Роговского. Динамика свечения разряда исследовалась с помощью ФЭУ-84-3, работающего в видимой области спектра. Фотосъемка разряда в интегральном свете производилась цифровой камерой Sony NEXF3 с объективом Sigma DN19 с выдержкой 1 с при чувствительности матрицы ISO200 и диафрагменных числах 5.6–11. Для получения изображений разряда с наносекундными выдержками применялась цифровая камера с быстрым затвором.

Магнитные измерения

Для измерений профиля тока импульсного разряда использовался магнитный зонд типа индуктивной петли диаметром 33 мм с пятью витками, перемещавшийся по радиусу установки (r). В экспериментах измерялась азимутальная (B_ϕ) компонента магнитного поля, в аксиально-симметричной геометрии создаваемая продольной (j_z) компонентой разрядного тока. С целью ослабления электрической наводки в сигнале и предупреждения высоковольтного пробоя зонд был помещен в электростатический экран, который, в свою очередь, был покрыт слоем диэлектрика толщиной около 1 мм. Зондовая цепь была изолирована от высоковольтной цепи разряда и от земли; цифровой осциллограф, использовавшийся для регистрации импульсных зондовых сигналов на нагрузочном сопротивлении 50 Ом, подключался к сети питания через разделительный трансформатор. Интегрирование импульсного сигнала с зонда $U \sim dB/dt$ производилось численно. Профиль тока восстанавливался из квазистатического закона Ампера в предположении аксиальной симметрии разряда, при этом плотность тока связана с магнитным полем и радиальной позицией зонда выражением

$$j_z = \frac{5}{2\pi} \left(\frac{B_\phi}{r} + \frac{dB_\phi}{dr} \right), \quad (1)$$

где величины j_z , B_ϕ и r выражены в А/см², Гс и см соответственно.

СВЧ-интерферометр

Для измерения концентрации плазмы разряда использовался СВЧ-интерферометр [7], схема которого представлена на рис. 2. Он состоит из генератора на диоде Ганна с частотой $f = 27.5$ ГГц, аттенуаторов для регулировки амплитуды волны в плечах интерферометра, фазовращателя для

установления начальной фазы измерения, кристаллических детекторов для контроля генерации СВЧ и системы регистрации интерференционной картины. Для облегчения конструкции, устанавливаемой в камере, в качестве излучающих элементов вместо металлических рупоров использовались диэлектрические антенны [8]. Кроме уменьшения веса, использование диэлектрических антенн позволило устанавливать их достаточно близко к разряду без опасения пробоя с “подвешенных” высоковольтных электродов на заземленную камеру. Для предупреждения переотраженных от металлических стенок камеры “паразитных” сигналов, излучающая и приемная антенны были окружены СВЧ-поглотителем. Для избавления от импульсных наводок, обусловленных источником высокого напряжения, в волноводных трактах по опорной и приемной линиям использовались диэлектрические волноводные вставки. Таким образом, за счет гальванической развязки с высоковольтной цепью был получен сигнал СВЧ-интерференции на неоднородном слое плазмы разряда, пригодный к дальнейшей обработке.

Для неоднородного по трассе распространения СВЧ-сигнала профиля концентрации $N_e(x)$ фазовый набег определяется выражением [7]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[L - \int_0^L \left(1 - \frac{N_e(x)}{N_c} \right)^{1/2} dx \right], \quad (2)$$

где $N_c = \pi m f^2 / e^2 = 9 \times 10^{12}$ см⁻³ – критическая концентрация плазмы для заданной частоты зондирования f (e и m – заряд и масса электрона соответственно), $\lambda = 11$ мм – длина волны зондирующего излучения в вакууме. В условиях эксперимента профиль плазмы, необходимый для корректного определения ее концентрации из фазового набег (2), выбирался на основе измерений профилей тока и светимости разряда. Для повышения точности процедуры, наряду с численным интегрированием выражения (2), использовались результаты прямого решения уравнений Максвелла по прохождению плоской электромагнитной волны через слой плазмы с заданным профилем $N_e(x)$ методом конечных разностей во временной области в одномерной геометрии.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Фотосъемка разряда

Интегральные фотографии разряда, зажигаемого в однородном газе при различных значениях его давления, представлены на рис. 3. Расстояние от острия стержневого электрода до дискового электрода составляло около 80 см. При давлениях ниже $p_0 = 1$ Торр разряд носит диффузный харак-

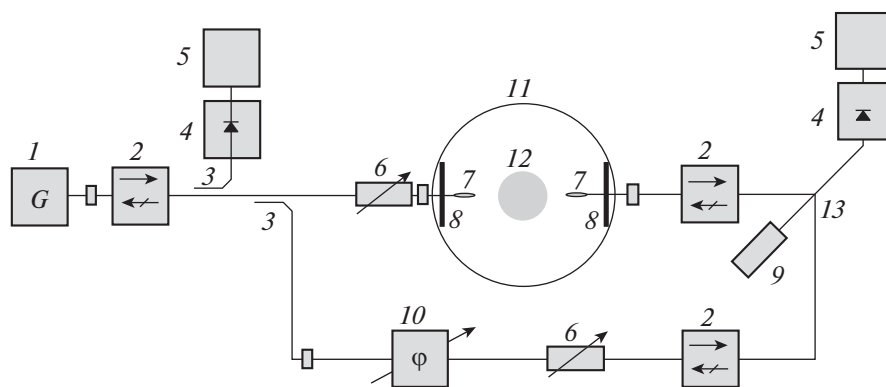


Рис. 2. Схема микроволнового интерферометра: 1 – СВЧ-генератор на диоде Ганна, 2 – ферритовый вентиль, 3 – направленный ответвитель, 4 – детектор, 5 – осциллограф, 6 – аттенюатор, 7 – диэлектрическая антенна, 8 – СВЧ-поглочитель, 9 – согласованная нагрузка, 10 – фазовращатель, 11 – вакуумная камера, 12 – разряд, 13 – двойной волноводный тройник.

тер, занимая конус, образованный острием стержневого электрода и дисковым электродом, при обеих полярностях напряжения, прикладываемого к промежутку. При одном и том же напряжении (6 кВ) объем свечения у отрицательного разряда несколько больше, чем у положительного. Квазистационарный характер диффузного свечения между электродами подтверждается съемкой на выдержке 10 нс, выполненной при различных задержках относительно начала импульса тока. По мере увеличения давления, диаметр свечения уменьшается, а интенсивность свечения вблизи оси увеличивается. В переходной области давлений, $1 \text{ Торр} < p_0 < 2 \text{ Торр}$, разряд трансформируется в шнур диаметром около 3 см. При более высоких давлениях наблюдается разряд с тонким каналом типа высоковольтной дуги, пробой газа в рабочем диапазоне высоких напряжений ($< 8 \text{ кВ}$) прекращается при $p_0 > 4 \text{ Торр}$.

В приэлектродных областях структуры отрицательного и положительного разряда заметно отличаются. В отрицательном разряде вблизи поверхности дискового (положительного) электрода наблюдаются множественные яркие пятна свечения: разряд существенно неоднороден (рис. 3а). Съемка с короткими выдержками показывает, что в процессе нарастания тока пятна возникают практически одновременно, в одних и тех же точках. Положение пятен неизменно в процессе разряда и сохраняется от одного разрядного импульса к другому, а значит задается неоднородностями на поверхности электрода. Для положительного разряда характерна контракция вблизи дискового электрода, однако мелкомасштабные пятна отсутствуют (рис. 3б).

На рис. 4 представлены фотографии разряда, зажигаемого в газе с градиентом давления. Снимки сделаны при импульсном напуске воздуха со

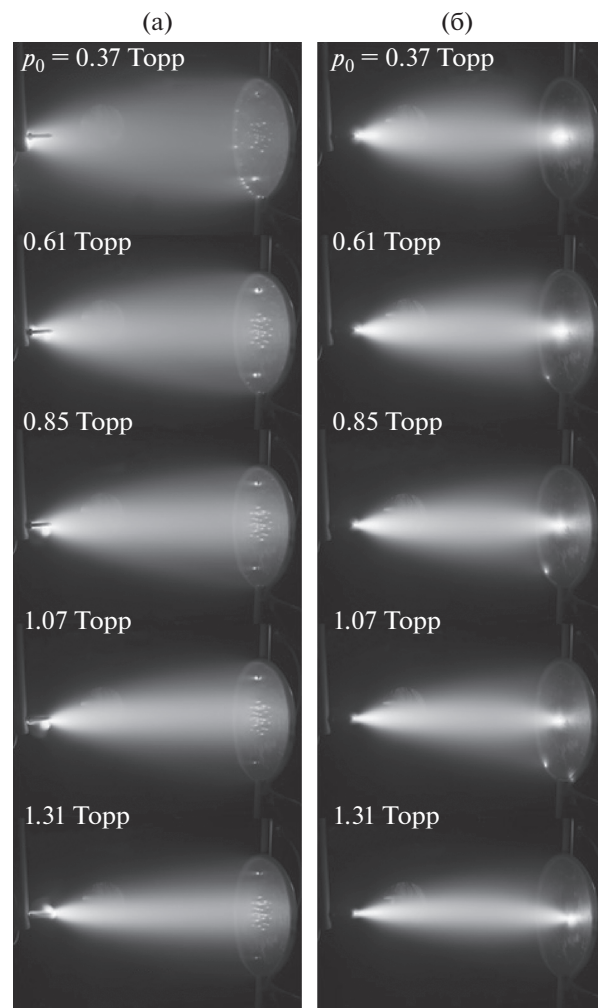


Рис. 3. Интегральные фотографии отрицательного (а) и положительного (б) разряда в однородном воздухе при различных давлениях p_0 .

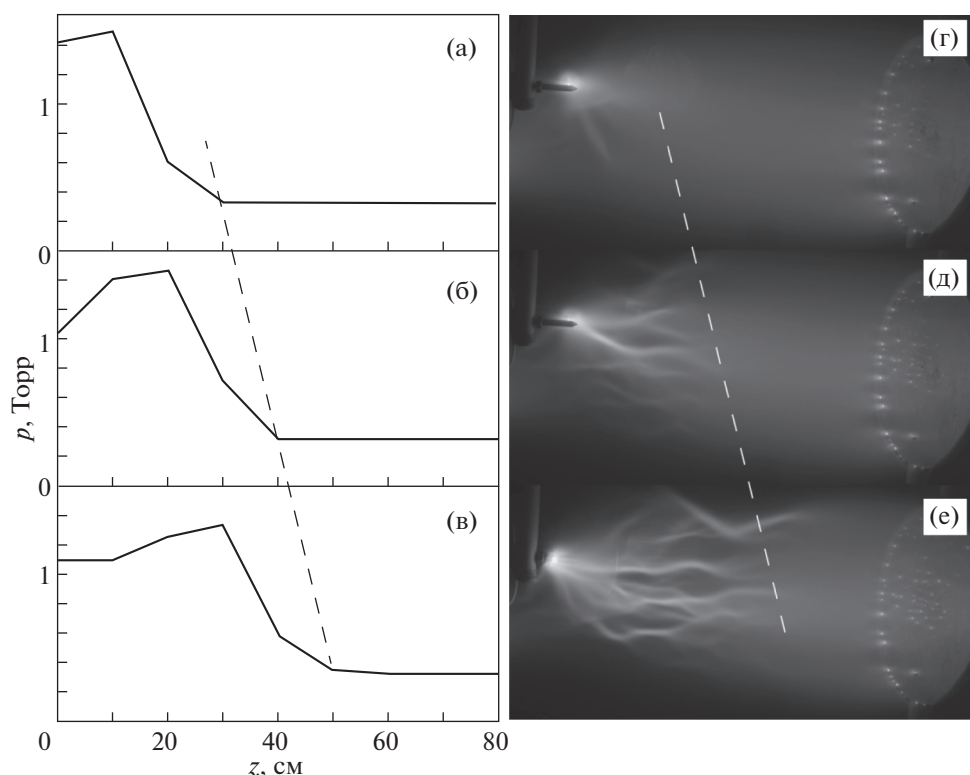


Рис. 4. Моментальные распределения давления по длине промежутка в различные моменты времени с шагом 0.5 мс после импульсного напуска воздуха (а)–(в); фотографии отрицательного разряда, зажигаемого в соответствующие моменты времени (г)–(е).

стороны стержневого электрода, начальное давление в камере составляло $p_0 = 0.37$ Торр. Динамика давления в камере, показанная на рис. 4, восстановлена по методике, описанной в [6]. Необходимо отметить, что ионизационный манометр, по своему принципу работы, измеряет не давление, а концентрацию молекул нейтрального газа. Если температура газа в рабочем объеме манометра отличается от значения, используемого при статической калибровке, то для корректного определения давления необходимо, вообще говоря, использовать поправочный коэффициент. Однако в данном случае влиянием изменений температуры на показания манометра можно пренебречь, поскольку воздух, поступающий в рабочее пространство манометра через межэлектродные зазоры поперек вектора скорости основного потока, успевает нагреться накальным катодом до температуры, близкой к температуре статической калибровки. По указанной причине, а также из соображений удобства, результаты измерений манометрическим преобразователем ПМИ-10-2 представлены в единицах давления (в Торр).

Согласно [5, 6] характерное время перераспределения газа в камере составляет несколько миллисекунд. Поэтому разряд длительностью не бо-

лее 40 мкс, фактически, “подсвечивает” газ с неоднородным профилем давления, установившимся к моменту подачи высокого напряжения на электроды. В данном случае скорость движения газового фронта составляет около 200 м/с. Свечение разряда в неоднородном газе включает две характерные области. Со стороны дискового электрода, где давление воздуха не успело измениться (p_0), разряд сохраняет диффузную форму. Со стороны стержневого электрода, где давление выше начального ($p = p_0 + \Delta p$), разряд трансформируется в отдельные яркие филаменты. Граница, на которой филаментированные структуры переходят в диффузное свечение, приближенно соответствует положению фронта давления напускаемого воздуха. Чем позже зажигается разряд относительно момента напуска газа, тем дальше эта граница смещается от стержневого электрода (рис. 4).

Съемка на коротких выдержках (2.5–10 нс) показывает, что неоднородная структура свечения в области повышенного давления формируется не позднее, чем через 1.5 мкс после начала нарастания тока. Все филаменты возникают одновременно и сохраняются до конца импульса тока, изменяется лишь контрастность свечения. Таким образом, исключается получение изображения

множественных филамент в результате многократного экспонирования одиночного разрядного канала в его динамике на длинной выдержке. Более того, по данным скоростной съемки на различных выдержках филаменты практически неподвижны — их ширина такая же, как на интегральных фотографиях. При этом разделение разряда на отдельные каналы вблизи штыревого электрода не влечет за собой заметных изменений в структуре диффузной области вблизи дискового электрода. Пока у разряда имеется протяженная диффузная область, скоростная съемка не позволяет выделить в ней никаких мелкомасштабных или динамических структур типа узких токовых каналов, которые были бы связаны с филаментами. Следовательно, интегральные фотографии с длинной выдержкой (1 с) адекватно передают форму разряда в воздухе, как с однородным, так и с неоднородным профилем давления. Полученные на длинной выдержке изображения сохраняют все основные детали структуры свечения, а, значит, могут использоваться как источник информации о профиле разряда, числе каналов и размерах неоднородных плазменных структур.

Далее мы сосредоточимся, в основном, на параметрах плазмы в диффузной области разряда. За счет относительно малой плотности электрического тока эта область допускает исследование как бесконтактными методами, так и зондовыми диагностиками без существенных возмущений ее структуры. Согласно [5] диффузная область разряда в воздухе с градиентом давления наблюдается в широком диапазоне давлений фона, вплоть до $p_0 \sim 1.5$ Торр; поперечная структура свечения диффузной области такая же, как в однородном газе. Следовательно, данные о параметрах плазмы в диффузной области разряда в неоднородном газе могут быть получены в более простых по постановке экспериментах с однородным газом. Кроме того, из измерений, выполняемых в однородном газе при повышенном давлении (более 1 Торр) может быть получена информация для оценки параметров тока и плазмы в филаментированных структурах разряда в воздухе с градиентом давления (рис. 4).

Профиль разрядного тока

Измерения поперечной структуры магнитного поля, создаваемого разрядным током, выполнялись в центральном сечении межэлектродного промежутка, длина которого составляла 72 см (от острия стержневого электрода до дискового электрода). Примеры профилей азимутального магнитного поля разряда в однородном газе, зажигаемого при давлениях в диапазоне $p_0 = 0.06$ –1 Торр, приводятся на рис. 5а; профили тока, восстановленные с помощью (1), представлены на рис. 5б. Плотность тока максимальна на оси; ра-

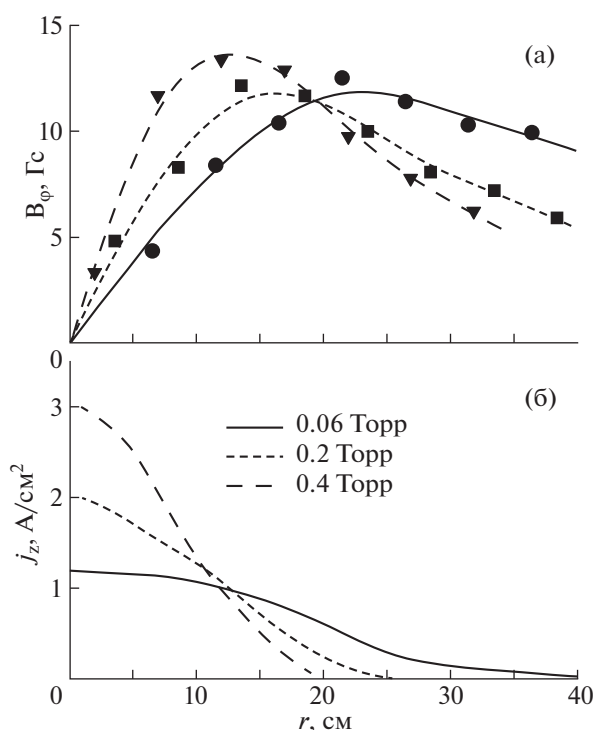


Рис. 5. Распределение B_ϕ компоненты магнитной индукции по радиусу при разных давлениях p_0 (а), восстановленная из магнитных измерений плотность тока в зависимости от радиуса (б).

диус токового канала достигает 30–40 см при низких давлениях ($p_0 < 0.1$ Торр), и уменьшается до 10 см при давлениях порядка 1 Торр. Таким образом, распределение тока близко к профилю интенсивности свечения разряда (рис. 3), и для определения размеров области ионизации и профиля плазмы можно использовать результаты фотосъемки разряда, по крайней мере, в его диффузной области.

Для оценки степени симметрии тока интегралы $\int_0^R j_z(r) r dr$ по сечению камеры сопоставлялись с результатами измерений полного разрядного тока, полученными поясом Роговского при тех же параметрах. Интегрирование производилось от оси до радиальной позиции $R = 40$ см. Расхождение результатов не превышает 10% для давлений $p_0 \sim 1$ Торр, при давлениях $p_0 \sim 0.1$ Торр расхождение еще меньше, что указывает на высокую степень аксиальной симметрии тока.

При давлениях выше 1 Торр измерения профиля тока затруднены, поскольку зонд начинает существенно влиять на структуру разряда, имеющего в этих условиях форму дугового канала. Несмотря на хорошую изоляцию зонда от разрядной цепи, металлической камеры и плазмы, наблюдается эффект “притяжения” дуги к близко распо-

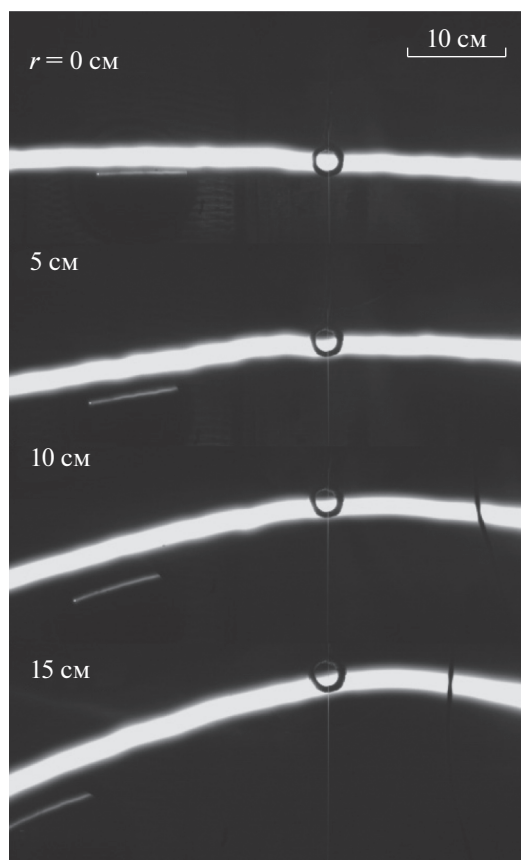


Рис. 6. Фотографии дуги при давлении $p_0 = 2$ Торр: “притяжение” токового канала к магнитному зонду, установленному в различных радиальных позициях r .

ложенному зонду (рис. 6). С высокой вероятностью, этот эффект обусловлен искажениями, вносимыми зондом в структуру электрического поля разряда, которое при таких давлениях сильно неоднородно по радиусу. Очевидно, что контактные средства диагностики могут весьма ограниченно применяться для изучения высоковольтных разрядов в данной форме.

Интерферометрические измерения

Характерная осциллограмма сигнала интерферометра для разряда в однородном воздухе приведена на рис. 7а. Отсечки СВЧ-сигнала не наблюдается, что говорит о том, что максимальная концентрация плазмы заметно ниже критической ($9 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$). Осцилляции сигнала указывают на набег фазы зондирующей электромагнитной волны, распространяющейся по плазме, в несколько π .

Для нахождения концентрации плазмы на оси камеры в выражении (2) необходимо использовать модельный профиль концентрации, для определения которого использовалась следующая

процедура. Поскольку поперечная структура тока близка к структуре свечения разряда, разумно предположить, что и распределение концентрации электронов близко к профилю интенсивности свечения. Физически обосновать это предположение можно, во-первых, тем, что плотность тока $j_z(r)$ пропорциональна концентрации электронов $N_e(r)$. Во-вторых, можно ожидать, что в разрядном импульсе длительностью порядка 10 мкс, с учетом низкой степени ионизации ($\eta < 10^{-4}$), интенсивность свечения пропорциональна электронной концентрации, $I(r) \sim N_e(r)$, если возбуждение излучающих молекул производится электронным ударом. Для определения профиля интенсивности свечения разряда вдоль трассы зондирующего СВЧ-сигнала производилась специальная обработка изображений, получаемых на матрице цифрового фотоаппарата; съемка с переменной экспозицией позволила исключить эффекты насыщения (переэкспонирования) на оси разряда. В результате в режиме линейного отклика матрицы для различных давлений были получены профили интенсивности, представленные на рис. 8. Именно эти профили использовались в качестве модельных распределений концентрации $N_e(x)$. С учетом предварительного (оценочного) характера эксперимента с интерферометром, на данном этапе мы не ввели корректировку профиля интенсивности, связанную с переменной толщиной разряда по хордам вдоль луча зрения.

Типичная зависимость концентрации плазмы N_e на оси разряда от времени, полученная в рамках описанной выше процедуры, представлена на рис. 7в вместе с осциллограммами тока разряда и его интегральной светимости, полученными, соответственно, с помощью пояса Роговского и ФЭУ (рис. 7б). Максимум концентрации близок к пику интенсивности свечения, однако задержан относительно максимума тока на 2–3 мкс. Кроме того, и оптическое излучение, и плазма регистрируются после окончания импульса тока. Характерное время распада плазмы по данным интерферометрических измерений можно оценить в 10 мкс.

Значения максимальной концентрации плазмы на оси разряда как функции давления воздуха и напряжения на электродах показаны на рис. 9 и 10. Качественно, полученные зависимости согласуются с данными по свечению разряда и измерениями разрядного тока, как из предыдущей работы [5], так и с представленными на рис. 5. При повышении давления диаметр токового канала уменьшается, плотность тока увеличивается, возрастает и концентрация плазмы — до значений $N_e > 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при $p_0 = 1$ Торр и напряжении на промежутке $U_0 = 8 \text{ кВ}$. В условиях, в которых получено большинство результатов по разряду с

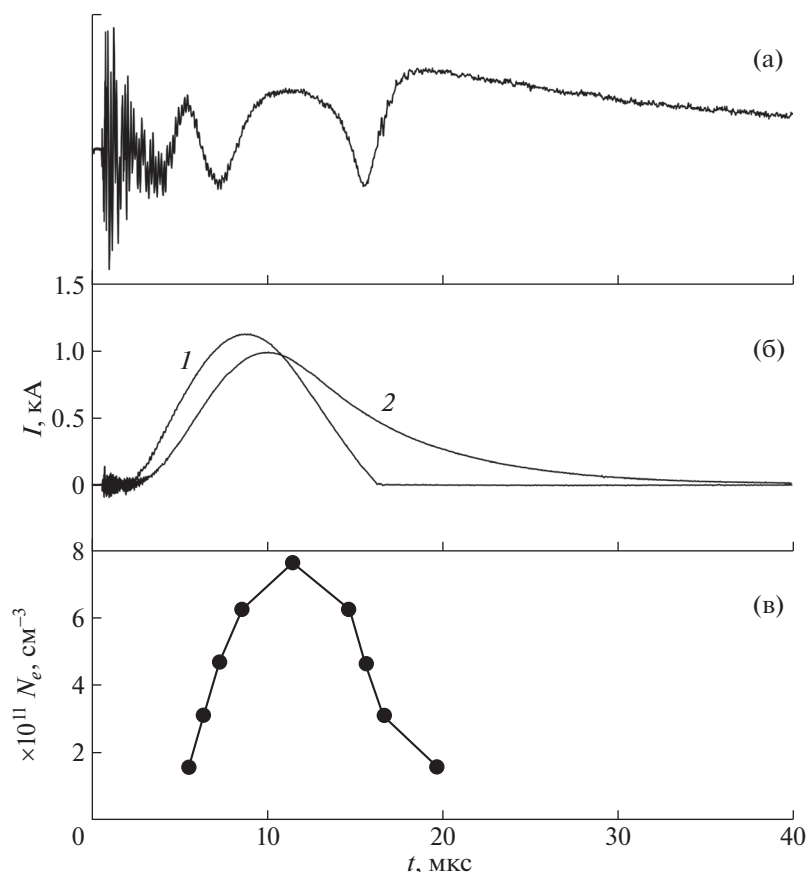


Рис. 7. Результаты измерений параметров импульсного разряда в однородном воздухе при давлении $p_0 = 1$ Торр и напряжении на промежутке $U_0 = 6.1$ кВ: интерферограмма разряда (а); осциллограммы разрядного тока (1) и интегральной светимости (2) (б); зависимость концентрации электронов N_e от времени (в).

градиентом давления ($p_0 = 0.3\text{--}0.6$ Торр, $U_0 = 6\text{--}7$ кВ), концентрация плазмы в диффузной области свечения составляет величину порядка $(3\text{--}5) \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные измерения плотности тока в разряде (рис. 5) и концентрации плазмы (рис. 9 и 10) являются существенным продвижением по сравнению с предыдущей работой [5]. Новые эксперименты позволяют уточнить оценки концентрации, следующие из измерений тока, и сопоставить эти оценки с данными СВЧ-интерферометрии. Кроме того, разряд, зажигаемый в однородном газе при давлениях ниже $p_0 \sim 1$ Торр, имеет диффузную (либо близкую к диффузной) форму без выраженных продольных градиентов, что позволяет более корректно оценивать напряженность поля E в области ионизации.

Согласно рис. 5, плотность продольного тока на оси разряда при давлениях в диапазоне $p_0 = 0.06\text{--}0.8$ Торр изменяется в пределах $j_z = 1\text{--}$

3 А/см². Поскольку длительность разрядного тока превышает характерные времена столкновений, включая упругие и неупругие процессы [5], движение электронов в разряде можно считать установившимся. Тогда для каждого из давлений p_0 концентрация плазмы может быть непосредственно определена из плотности тока $j_z = eN_e v_d$, если известна дрейфовая скорость электронов v_d [9].

Напряженность электрического поля в центральной области межэлектродного промежутка длиной $L = 72$ см можно оценить как $E = U_0/L$, что для типичных напряжений $U_0 = 6$ кВ дает $E \sim 83$ В/см. При давлениях в диапазоне $p_0 = 0.1\text{--}0.8$ Торр, для нормальных условий эта напряженность соответствует приведенным полям $E/N = 290\text{--}2300$ Тд. Согласно справочным данным (например, [10]), такие приведенные поля соответствуют дрейфовым скоростям $v_d = (2.5\text{--}15) \times 10^7$ см/с. Значения концентрации плазмы, восстановленные с использованием значений дрейфовой скорости для каждого значения E/N , пред-

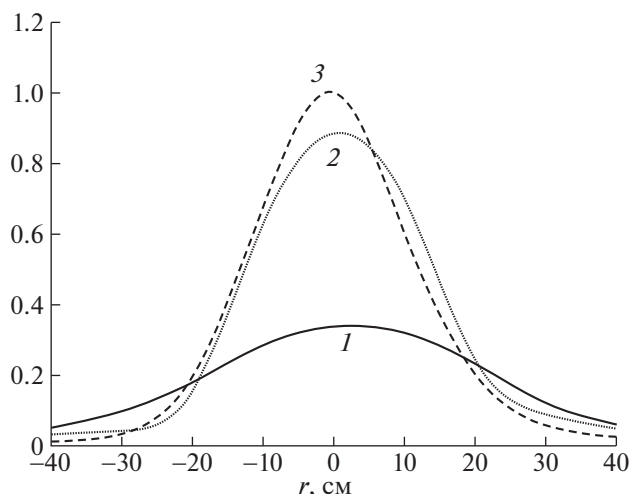


Рис. 8. Профили интенсивности свечения разряда по трассе зондирующего СВЧ-сигнала при различных давлениях: 1 – 0.38, 2 – 0.68, 3 – 1.0 Торр.

ставлены на рис. 10 как функция давления p_0 . Значения максимальной концентрации плазмы, полученные с помощью СВЧ-интерферометра при разрядном напряжении $U_0 = 6$ кВ, нанесены на тот же график. Точки, полученные двумя разными способами, ложатся на одну прямую. Таким образом, оба метода дают корректные оценки концентрации N_e , и приближения, использованные для оценки параметров плазмы разряда в неоднородном воздухе в работе [5], в целом верны. Оценки концентрации, полученные в [5] из

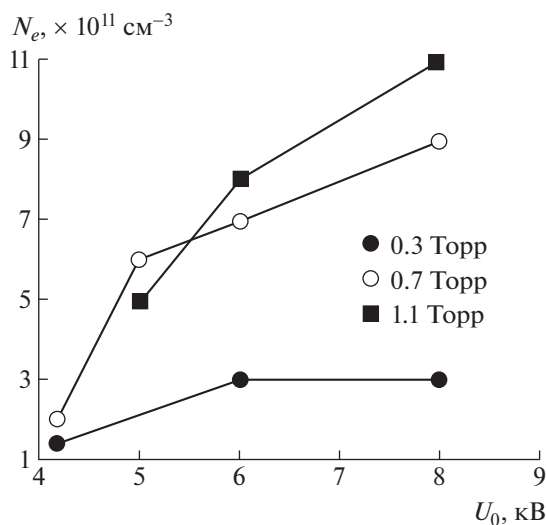


Рис. 9. Зависимость максимальной концентрации плазмы на оси разряда от напряжения на электродах U_0 для различных давлений p_0 по данным СВЧ-интерферометрии.

измерений полного разрядного тока, отличаются от данных рис. 9, 10 не более чем в два раза для тех же значений p_0 и U_0 .

Сравнение рис. 5 и 8 показывает, что профиль интенсивности диффузного свечения всегда оказывается несколько шире профиля тока. Этот результат выглядит ожидаемым, поскольку величина плотности тока $j_z(r)$ определяется не только распределением $N_e(r)$, но и профилем дрейфовой скорости электронов $v_d(r)$, которая, в свою очередь, зависит от напряженности электрического поля E . Так как величина продольного электрического поля спадает по радиусу с масштабом порядка радиуса дискового электрода, $R = 20$ см, профиль тока получается более резким, чем профиль концентрации.

Полученные значения концентрации достаточно типичны для импульсных высоковольтных разрядов диффузного типа, зажигаемых в воздухе при пониженном давлении. В частности, в работе [11] методом СВЧ-интерферометрии наносекундного разряда с $U_0 = 11$ кВ на промежутке длиной $L \sim 20$ см получена концентрация плазмы $N_e = (2-3) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при давлениях $p \sim 2.5$ Торр и выше. С учетом всей специфики подобных разрядов, этот результат согласуется с закономерностями, иллюстрируемыми рис. 9 и 10. Близкие значения концентрации плазмы представлены в работе [12].

Параметры плазмы в филаментированной области разряда с градиентом давления (рис. 4) определить сложнее. СВЧ-интерферометрия затруднена тем, что поперечный масштаб филамен-

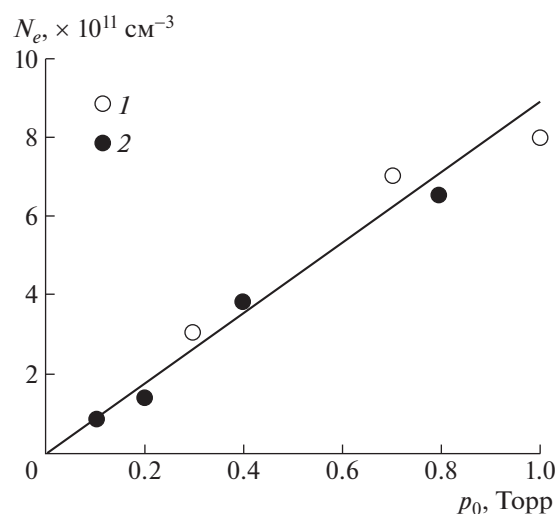


Рис. 10. Зависимость концентрации плазмы N_e на оси разряда от давления однородного газа в камере p_0 при напряжении на электродах $U_0 = 6$ кВ: 1 – данные СВЧ-интерферометрии, 2 – оценки из плотности тока.

тированных структур (~ 1 см) близок к длине волны зондирующего излучения. Кроме того, плотность тока в каждой из филамент, как минимум, на порядок превышает плотность тока в диффузной области, а значит концентрация плазмы в филаментах оказывается порядка или больше критической, $N_e \geq N_c$, для используемой частоты зондирования. В результате, просвечивание СВЧ-волной филаментированной области разряда в воздухе с градиентом давления (рис. 4) дает сильно зашумленный, пульсирующий сигнал, из которого трудно извлечь диагностическую информацию. Использовать контактные методы также затруднительно по причине искажений структуры разряда зондами (рис. 6).

Отметим, однако, что филаменты, появляющиеся в области локального увеличения давления до $p = 1.5\text{--}2.5$ Торр (рис. 4), подобны дуге в однородном газе (рис. 6). В частности, эти структуры близки по интенсивности свечения, поперечному масштабу и плотностям тока. Ток импульсной дуги, показанной на рис. 6, составляет $I_0 \leq 200$ А, ток в каждой из филамент, показанных на рис. 4, порядка $100\text{--}150$ А (при полном токе разряда $I_0 \sim 1$ кА). Дуга имеет достаточно резкие границы, диаметр (около 3 см) и яркость канала практически постоянны по длине промежутка. При давлении $p_0 = 2$ Торр, для того же значения напряженности электрического поля $E = 83$ В/см, приведенное поле оценивается как $E/N = 120$ Тд, и дрейфовая скорость электронов в дуге, согласно [6], $v_d = 10^7$ см/с. Плотность тока в дуге на порядок выше, чем в диффузном разряде, $j_z = 28$ А/см², оценка концентрации электронов дает значение $N_e = 1.3 \times 10^{13}$ см⁻³. С высокой вероятностью, такие же значения концентрации плазмы характерны для филамент разряда в неоднородном воздухе (рис. 4 и работа [5]).

Поскольку полный ток, протекающий через каждую из филамент, составляет порядка 100 А, локальные магнитные поля достаточно сильны ($B \sim 10\text{--}100$ Гс), и динамика плазменных структур может в значительной мере определяться пинч-эффектом. Для шнура диаметром 1 см с током 100 А баланс силы Ампера и газокINETического давления плазмы достигается при концентрации $N_e > 10^{13}$ см⁻³, если температура электронов T_e в шнуре порядка нескольких эВ. Это значение N_e близко к полученной выше оценке концентрации плазмы дуги (рис. 6), и, соответственно, в филаментах разряда с градиентом давления.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы параметры крупномасштабного импульсного разряда, зажигаемого в воздухе на метровом межэлектродном промежутке при напряжениях до 8 кВ в диапазоне давлений от 0.05

Торр до нескольких Торр. Разряд зажигается как в однородном фоновом газе, так и при наличии градиента давления между электродами, формирующегося при импульсном напуске воздуха с торца разрядной камеры. В последнем случае пространственная структура разряда подобна структуре высотных разрядов в атмосфере Земли, таких как, например, спрайты: филаментированные структуры, ориентированные, преимущественно, вдоль направления протекания тока, в области повышенного давления, переходят в квазиоднородное диффузное свечение в области пониженного давления.

С помощью магнитного зонда и СВЧ-интерферометра на частоте 27.5 ГГц восстановлен поперечный профиль плотности тока и измерена концентрация плазмы в диффузной области разряда. Профиль интенсивности свечения разряда близок к профилю тока и, соответственно, к пространственному распределению концентрации электронов. В качестве альтернативного метода, значения концентрации плазмы определены на базе измеренных плотностей тока и значений дрейфовой скорости электронов в приближении постоянной напряженности электрического поля на длине разрядного промежутка. Полученные двумя разными способами результаты хорошо согласуются; концентрация плазмы диффузной области разряда в диапазоне давлений $p_0 = 0.05\text{--}1$ Торр составляет $N_e = 10^{11}\text{--}10^{12}$ см⁻³.

Концентрация плазмы в отдельных филаментах, наблюдаемых в разряде с градиентом давления воздуха, оценивается на уровне 10^{13} см⁻³. Такие же значения концентрации характерны для высоковольтной дуги, в которую разряд в однородном газе переходит при давлениях $p_0 = 1.5\text{--}2$ Торр. Получение более надежных количественных данных о параметрах филаментированных структур разряда возможно в будущем за счет использования бесконтактных средств диагностики, включая методы пассивной оптической спектроскопии и СВЧ-интерферометрию на более коротких волнах.

Авторы выражают благодарность Н.А. Богатову и Ю.В. Шлюгаеву за предоставленное оборудование для скоростной съемки. СВЧ-интерферометр создан при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-01182-а). Исследования пространственной структуры и динамики разрядного тока выполнены С.В. Коробковым и А.А. Евтушенко при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-12-00441).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pasko V.P. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. A00E35.

2. *Fullekrug M., Mareev E., Rycroft M.* // NATO Science. Cluwer: Springer. 2006. V. 225. 398 p.
3. *Liu N., Pasko V.P., Frey H.U., Mende S.B., Su H.-T., Chen A.B., Hsu R.-R., Lee L.-Ch.* // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. P. A00E02.
4. *Pasko V.P., Stenbaek-Nielsen H.C.* // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. P. 1440.
5. *Стриковский А.В., Евтушенко А.А., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 866.
6. *Коробков С.В., Гуцин М.Е., Стриковский А.В., Лоскутов К.Н., Евтушенко А.А.* // ЖТФ. 2019. Т. 89. С. 35.
7. Зондирование плазмы электромагнитными волнами / Под ред. Душина Л.А. М.: Атомиздат, 1973.
8. *Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П.* Справочник по волноводной технике. М.: Советское радио, 1967.
9. *Васильева Р.В., Ерофеев А.В., Жуков Б.Г., Лапушкина Т.А., Поняев С.А., Бобаев С.В.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. С. 67.
10. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
11. *Александров Н.Л., Анохин Е.М., Киндышева С.В., Кирпичников А.А., Косарев И.Н., Худнова М.М., Стариковская С.М., Стариковский А.Ю.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 200.
12. *Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Yu., Zatssepina D.V.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. V. 31. P. 1118.