

ОБЗОРЫ

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Сверхвысокочастотные разряды и их применение

I. Поверхностный СВЧ-разряд

В. М. Шибков^a

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физической электроники.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

Поступила в редакцию 25.04.2019, после доработки 13.06.2019, принята к публикации 21.06.2019.

В обзоре представлены результаты цикла фундаментальных исследований нового типа поверхностного СВЧ-разряда, проведенных на физическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова. Разряд создавался поверхностной волной на диэлектрической антенне при подводе к ней мощного электромагнитного излучения сантиметрового диапазона длин волн. В широком диапазоне изменения внешних условий изучены основные свойства СВЧ-разряда и пространственно-временная эволюция параметров создаваемой поверхностным разрядом плазмы.

Ключевые слова: поверхностный сверхвысокочастотный разряд, низкотемпературная плазма, концентрация электронов, температура электронов, нагрев газа, механизмы распространения разряда, моделирование, диагностика.

УДК: 533.9. PACS: 52.70.ds, 52.70.-m, 52.80.-s.

ВВЕДЕНИЕ

Успехи в развитии электроники сверхвысоких частот создали предпосылки для генерации газоразрядной плазмы в условиях СВЧ-разрядов, создаваемых с помощью электромагнитного излучения в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. СВЧ-разряды используются в плазмохимии, аналитической химии, экологии, в качестве газоразрядных источников света, в плазменных преобразователях частоты, антенных переключателях. В настоящее время для генерации низкотемпературной плазмы разработаны многочисленные типы СВЧ-устройств, при этом свойства плазмы оказываются зависящими от способа ее получения. Тип устройства определяет структуру электромагнитного поля в разрядной области и энергетическую эффективность СВЧ-генератора. Достоинствами СВЧ-разрядов являются простота получения плазмы, достижение высокого уровня удельного энерговклада в плазму, широкая область давлений газовой среды 10^{-5} – 10^3 торр. С помощью СВЧ-разряда возможно создавать как неравновесную, так и квазиравновесную плазму, использовать безэлектродные способы создания плазмы, при этом отсутствует загрязнение объема плазмы и обрабатываемых образцов продуктами эрозии электродов. Одновременное использование плазменных генераторов с различными частотами электромагнитного излучения позволяет создать комбинированные микроволновые разряды в режиме программированного воздействия.

Для развития современной авиации требуются поиск и разработка новых эффективных средств, позволяющих управлять характеристиками газового потока вблизи поверхности летательного аппарата, контролировать передачу тепла и массоперенос в пограничном слое, снижать поверхностное

трение, задерживать ламинарно-турбулентный переход, управлять отрывом потока. Важной задачей является поиск способов, позволяющих уменьшать время воспламенения и управлять процессом горения при сверхзвуковых течениях топливно-воздушных смесей в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Одно из новых решений данных проблем — использование различного типа газовых разрядов, в том числе и СВЧ-разрядов. Поэтому в последнее время интенсивно развивается новое направление в физике плазмы, а именно сверхзвуковая плазменная аэродинамика. При этом для улучшения аэродинамических характеристик летательных аппаратов предлагается создавать перед ними и на их несущих поверхностях плазменные образования, а для целей уменьшения времени воспламенения горючего и стабилизации горения в гиперзвуковом прямоточном воздушно-реактивном двигателе использовать неравновесную газоразрядную плазму.

Низкотемпературная плазма широко используется в новых технологических процессах субмикронной электроники, таких как травление, очистка поверхности, осаждение тонких пленок и ионная имплантация. Требования, накладываемые на источники плазмы, заключаются в следующем [1]: большой диаметр плазмы, не менее 300 мм, пространственная порядка 1–2% однородность параметров плазмы (концентрация и температура электронов, концентрация ионов), высокая концентрация ионов $\sim 10^{11}$ – 10^{12} см⁻³, низкие энергии ионов ~ 1 – 10 эВ. Наиболее перспективными источниками плазмы являются СВЧ-источники на основе поверхностной волны. Главное преимущество нагрева с помощью поверхностных СВЧ-разрядов — отсутствие магнитного поля и тот факт, что происходит прямая передача энергии электромагнитного поля непосредственно к электронам, что позволяет достичь высокой плотности заряженных частиц.

^a E-mail: shibkov@phys.msu.ru

Известно [2–4], что при создании СВЧ-разряда внутри заполненной газом при низком давлении трубки с диэлектрическими стенками подводимая к системе электромагнитная энергия трансформируется в поверхностную волну. При этом возникает самосогласованная система, когда плазменная среда создается поверхностной волной, в то же время плазма необходима для самого существования поверхностной волны, то есть присутствие плазмы является необходимым условием для распространения поверхностной волны. При этом волна распространяется в пространстве до тех пор, пока ее энергия достаточна для создания плазмы с концентрацией электронов не меньше, чем критическая концентрация

$$n_{ec} = \frac{m_e(\omega^2 + \nu_{en}^2)}{4\pi e^2}, \quad (1)$$

где e и m_e — заряд и масса электрона, ω — круговая частота поля, ν_{en} — частота столкновений электронов с нейтральными молекулами газа. За границу области пространства, где концентрация электронов уменьшается до значения n_{ec} , поверхностная волна не проникает и поверхностный разряд в этих местах не существует. Данный способ генерации плазмы и устройство для ее создания называются сурфатроном. Этот способ достаточно подробно исследован [2–5] и широко используется, например в плазмохимии. В этом случае мы имеем систему плазма—диэлектрик—свободное пространство, т.е. внутри разрядной трубки, заполненной газом при пониженном давлении, существует создаваемая поверхностной волной плазма, ограниченная стенками диэлектрической трубки, разделяющими плазму и окружающее разрядную трубку свободное пространство.

В ряде работ [6–8] исследуются скользящие по поверхности диэлектрика электродные разряды типа «плазменный лист». В [6] рассматриваются вопросы, связанные с динамикой развития скользящего разряда на поверхности пластины, обтекаемой потоком вязкого газа. Показано, что изменение величины энерговклада в разряд позволяет изменять в широких пределах силу трения со стороны пограничного слоя. В [7, 8] приведены результаты экспериментов по определению структуры плазменного слоя скользящего разряда в неподвижном воздухе и в однородном потоке за плоской ударной волной. В [9] проведено исследование импульсного высоковольтного разряда, распространяющегося над поверхностью жидкости. Показано влияние глубины жидкости на характер распространения импульсного разряда.

В последнее время интенсивно развиваются исследования разрядов, создаваемых в коаксиальных конфигурациях. Электродный микроволновой разряд, возникающий в окрестности торца центрального проводника коаксиальной линии, является примером такого разряда [10]. Электродный СВЧ-разряд позволяет интенсифицировать физико-химические процессы в газовой фазе, включая синтез алмазов, получения нанотрубок, нанесения покрытий. В [11] проводятся исследования микроволновых коаксиальных источников плазмы, которые представляют интерес для различных плазменных технологий. Специфической микроволновой факелы является существенный

отрыв электронной температуры от газовой. При этом протекающий через микроволновый факел газ быстро нагревается. В работе [12] описывается импульсный СВЧ-разряд в воздухе атмосферного давления вблизи поверхности диэлектрической пластины и в зазоре между двумя диэлектрическими пленками. Разряд имеет вид прижатых к поверхности ветвящихся стримерных каналов, заполняющих поперечное сечение СВЧ-пучка с уровнем поля, превышающим значение, отделяющее подкритическую форму стримерного СВЧ-разряда. Показано, что разряд развивается в виде стримерных каналов с диаметром в несколько десятых долей миллиметра только вблизи поверхности, на которой расположен инициатор. В [13, 14] поверхностный СВЧ-разряд создавался с использованием коаксиальной линии. В этих работах СВЧ-генератор на стандартной частоте 2.45 ГГц возбуждал в непрерывном режиме при максимальной мощности 1 кВт прямоугольный резонатор, связанный с коаксиальной линией. Диэлектрическая кварцевая трубка помещалась в камеру низкого давления между внешним и внутренним коаксиальными металлическими электродами. Линейный поверхностный разряд возбуждался на внешней поверхности трубки. В [13] для формирования протяженной однородной плазмы электромагнитная энергия подводилась с обоих концов коаксиальной линии. Экспериментально измерялись радиальные и продольные зависимости концентрации электронов и напряженности электрического поля.

В лаборатории физического факультета МГУ для целей сверхзвуковой плазменной аэродинамики была предложена новая разновидность сверхвысокочастотного разряда [15], а именно микроволновой разряд, который создается поверхностной волной на диэлектрической антенне, обтекаемой сверхзвуковым потоком воздуха. При этом для поддержания стабильного плазменного столба значительной длины в широком диапазоне давлений газа можно использовать поверхностные волны в высокочастотном и сверхвысокочастотном диапазонах длин волн. В [15, 16] поверхностный СВЧ-разряд создавался не внутри полой трубки с диэлектрическими стенками, заполненной газом при низком давлении, а на внешней поверхности сплошной диэлектрической антенны, изготовленной из тефлона либо кварца. Антенна снабжена устройством согласования с металлическим волноводом, по которому подводится электромагнитная энергия сантиметрового диапазона длин волн. В этом случае внутри располагается диэлектрик, на поверхности которого создается плазма, существование которой поддерживается поверхностной СВЧ-волной. Получено, что поверхностный СВЧ-разряд в этих условиях представляет собой однородно светящийся приповерхностный плазменный слой толщиной $h \sim 1$ мм, равномерно покрывающую внешнюю поверхность широких стенок диэлектрической антенны прямоугольного сечения. Показано, что плазменная область может быть сформирована различной протяженности и формы. Данный способ создания низкотемпературной неравновесной плазмы на внешней поверхности диэлектрической антенны является эффективным средством ввода дополни-

тельной тепловой энергии в пограничный слой, возникающий вблизи тела, движущегося в воздушной среде. Поверхностный СВЧ-разряд позволяет управлять характеристиками газового потока вблизи поверхности летательного аппарата, контролировать передачу тепла и массоперенос в пограничном слое, снижать поверхностное трение, задерживать ламинарно-турбулентный переход, управлять отрывом потока, уменьшать время воспламенения топлива и управлять процессом горения сверхзвуковых потоков горючих смесей в прямоточном воздушно-реактивном двигателе.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ

Изучение основных свойств поверхностного СВЧ-разряда проводилось на установке, подробное описание которой, а также используемых методов диагностики, представлено в [16–26]. Основой экспериментальной установки является откачиваемая металлическая цилиндрическая барокамера объемом 3 м^3 . Вакуумная система позволяет проводить эксперименты в диапазоне давлений воздуха от 10^{-3} до 10^3 торр. Барокамера одновременно служит как для обеспечения необходимого давления при исследовании свойств поверхностного СВЧ-разряда в неподвижном газе, так и для создания сверхзвукового потока, а также в роли резервуара для выхлопных газов и продуктов горения газообразных и жидких топлив. Внутренний диаметр вакуумной камеры равен 1 м, ее длина — 3 м. К камере подсоединены ресиверы высокого давления для воздуха, газообразного углеводородного (пропан) и жидкого углеводородсодержащего (спирт, керосин) топлива. Система хранения воздуха высокого давления состоит из газгольдера объемом 0.6 м^3 с компрессором, поднимающим давление воздуха до максимальной величины $p = 6$ атм, клапана высокого давления, запорного клапана и электромагнитного клапана с временем срабатывания $t \sim 10$ мс. Длительность существования квазистационарного воздушного потока $t = 3$ с. Секундный массовый расход воздуха мог изменяться от 25 г/с до 150 г/с. Сверхзвуковой поток создается при заполнении барокамеры воздухом через специально профилированное сопло Лаваля, установленное на выходной трубке электромеханического клапана. В экспериментах измерения проводились с использованием сопла прямоугольного сечения, рассчитанного для числа Маха потока $M = 2$. Сопло изготовлено из диэлектрического материала для предотвращения его влияния на распределение электромагнитного поля вблизи диэлектрической антенны. Система накопления и хранения газообразного горючего состоит из стандартного баллона объемом 0.04 м^3 , который содержит жидкий пропан. Через запорный клапан и редуктор уже газообразное топливо поступает в ресивер. Ресивер представляет собой баллон объемом 0.012 м^3 . Секундный массовый расход пропана в эксперименте мог изменяться от 1 г/с до 6 г/с. Воздух и пропан первоначально поступают в смеситель, установленный в дозвуковой части канала. Смешивание происходит в основном до критического сечения сверхзвукового

сопла. Система инъекции жидкого углеводородсодержащего топлива в высокоскоростной воздушный поток состоит из металлического баллона, заполненного жидким топливом. Баллон соединен через герметически впаянную металлическую трубку и гибкий шланг с инжектором. Инъекция жидкого топлива осуществляется или непрерывно в течение определенного времени, или в импульсно-периодическом режиме с регулируемыми длительностями импульсов и частотой их следования. Секундный массовый расход жидкого топлива мог изменяться от 0.5 г/с до 2.5 г/с. Для синхронизации работы электромеханических затворов и разряда используется специальная схема, создающая временную задержку между открытием клапанов в воздуховодах, обеспечивающих подвод воздуха, газообразного пропана и спирта, а также включением разряда.

Ввод СВЧ-излучения в вакуумную камеру осуществляется через герметизированный блок, расположенный на одном из иллюминаторов. СВЧ-энергия с помощью волновода подводится к диэлектрической антенне, выполненной из тефлона или кварца. Антенна представляет собой диэлектрический стержень прямоугольного сечения размером $0.95 \times 1.9 \text{ см}^2$ и длиной 11.8 см с клинообразной торцевой частью с углом 25° при вершине клина. Она установлена по оси симметрии прямоугольного сверхзвукового сопла. Направление сверхзвукового потока противоположно распространению поверхностного СВЧ-разряда. Источником СВЧ-излучения служит импульсный магнетронный генератор сантиметрового диапазона длин волн. Магнетронный генератор имеет следующие характеристики: длина волны $\lambda = 2.4$ см; импульсная СВЧ-мощность $W < 250$ кВт; длительность импульса $\tau = 1\text{--}200$ мкс; скважность $Q = 1000$, при этом средняя мощность не превышает 250 Вт. Питание магнетрона осуществляется импульсным модулятором с частичным разрядом накопительной емкости. СВЧ-мощность подводится к разрядной камере с помощью волноводного тракта прямоугольного сечения $0.95 \times 1.9 \text{ см}^2$. Весь тракт герметизирован, а для предотвращения электрического СВЧ-пробоя внутри волновода он наполняется элегазом SF_6 при давлении 4 атмосферы. Для создания поверхностного СВЧ-разряда используется специально разработанное устройство для связи конца волновода, введенного в разрядную камеру, с диэлектрической (кварц, тефлон) антенной, на которой создается поверхностный СВЧ-разряд. Будем считать, что положительное направление оси Ox совпадает с направлением распространения вдоль антенны поверхностной сверхвысокочастотной волны. Координата $x = 0$ соответствует концу волновода, по которому подводится электромагнитная энергия к антенне, на которой формируется поверхностный СВЧ-разряд. Направление распространения сверхзвукового потока противоположно направлению распространения разряда вдоль антенны.

Для изучения параметров плазмы применяются как дистанционные бесконтактные, так и контактные диагностические методы. Исследования проводятся с временным и пространственным разрешениями.

Диагностический комплекс состоит из монохроматоров и спектрографов с цифровой регистрацией спектра, блока зондовой диагностики с цифровой регистрацией вольт-амперных характеристик, датчиков давления, термопар, тензодатчиков, теневой установки, рефракционных лазерных датчиков, накаливаемого в потоке пламени электрического зонда, системы измерения проводимости пламени, электронных датчиков измерения концентраций пропана, углекислого газа, температуры, абсолютной и относительной влажности, цифровых фотоаппаратов, высокоскоростной цифровой видеокамеры, цифровых осциллографов, компьютеров.

Общий вид поверхностного СВЧ-разряда фиксируется с использованием цифрового фотоаппарата в двух проекциях (вид сбоку и вид сверху) при различных давлениях воздуха, длительностях и мощностях СВЧ-импульсов. При последующем воспроизведении изображений разряда на мониторе компьютера измеряются размеры разряда и определяются поперечная и продольная скорости его распространения. Динамика поверхностного СВЧ-разряда изучается также с использованием высокоскоростной цифровой видеокамеры «ВидеоСпринт» с электронно-оптическим наносекундным затвором. Съемка проводится при частоте повторения кадров от 5 до 50 кГц и времени экспозиции одного кадра 2 мкс.

Для измерения пороговых характеристик поверхностного СВЧ-разряда в эксперименте регистрируются зависимости минимальной подводимой мощности, при которой начинает образовываться разряд на поверхности диэлектрического тела, от давления p воздуха в барокамере при различных длительностях τ импульса. Для этого подводимая СВЧ-энергия при фиксированных τ и p постепенно увеличивается и фиксируется тот уровень мощности, при котором на поверхности диэлектрического тела начинает образовываться плазма. Такие измерения проводятся несколько раз, после чего усредняются полученные данные. После этого давление в барокамере при фиксированной длительности импульса изменяется и регистрируется значение пороговой мощности при новом давлении. В экспериментах момент образования разряда фиксируется визуально или по появлению на экране цифрового осциллографа сигнала с коллимированного фотоэлектронного умножителя, настроенного на область антенны у среза волновода. При этом на второй луч осциллографа подается сигнал с СВЧ-детектора. Амплитуда этого сигнала пропорциональна подводимой импульсной СВЧ-мощности.

Температура газа определяется спектроскопическим методом, основанным на регистрации распределения интенсивностей линий вращательной структуры полосы (0;2) с длиной волны канта $\lambda = 380.5$ нм второй положительной системы азота [17–26]. Для измерения газовой температуры проводится регистрация спектра излучения плазмы поверхностного СВЧ-разряда с использованием спектрографа СТЭ-1 (с переменной обратной линейной дисперсией (0.03–0.10) нм/мм), монохроматоров ДФС-12 и МДР-23 (обратные линейные диспер-

сии 0.05 нм/мм и 0.13 нм/мм соответственно), а также с помощью двухканального спектрографа AvaSpec-2048-2-DT фирмы Avantes с обратной линейной дисперсией 0.05 нм/мм для первого канала и 0.32 нм/мм для второго. Минимальное время экспозиции $\tau = 2$ мс. При измерении временного хода температуры газа в течение СВЧ-импульса длительностью 100 мкс используются два монохроматора с фотоэлектронными умножителями в качестве приемников излучения [18]. Перед проведением измерений проводится калибровка чувствительности измерительных трактов. Для этого монохроматоры настраивались на одну и ту же спектральную линию, излучаемую плазмой импульсного поверхностного СВЧ-разряда. Изменяя напряжения питания на фотоэлектронных умножителях, добиваются идентичности формы и амплитуды выходных сигналов. После этого монохроматоры настраиваются на заранее выбранные вращательные линии полосы (0;2) второй положительной системы азота. При этом на осциллографе одновременно регистрируется временной ход интенсивности свечения двух вращательных линий исследуемой полосы. Это позволяет определять временной ход температуры газа при однократной реализации поверхностного СВЧ-разряда. Концентрация электронов в плазме поверхностного СВЧ-разряда в воздухе измерялась спектроскопическим методом по регистрации штарковского уширения спектральных линий H_β и H_α бальмеровской серии водорода с длинами волн 486.1 нм и 656.5 нм [19, 22–24, 26]. В качестве малой примеси в камеру добавлялся водород в количестве, необходимом для возбуждения рассматриваемых спектральных переходов. Концентрация электронов вычислялась по полуширине $\Delta\lambda$ линии с учетом уширяющих факторов, связанных с эффектом Доплера (~ 0.01 нм), внешним микроволновым эффектом Штарка (~ 0.01 нм), аппаратной функцией спектрального прибора (0.015 нм) и конечной шириной входной щели монохроматора. Созданный диагностический комплекс позволяет в масштабах реального времени получать данные о нескольких параметрах неравновесной плазмы поверхностного СВЧ-разряда.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Пороговые характеристика возникновения поверхностного СВЧ-разряда в воздухе [19, 27]

В разделе рассмотрены основные свойства поверхностного СВЧ-разряда при изменении давления воздуха от 10^{-3} до 10^3 торр. Вначале были определены диапазоны давления воздуха и подводимой микроволновой мощности, при которых возможно создать в импульсно-периодическом режиме поверхностный СВЧ-разряд на тефлоновой антенне. На рис. 1 в двойном логарифмическом масштабе приведены зависимости минимальной импульсной СВЧ-мощности, необходимой для пробоя и начала образования поверхностного разряда на диэлектрической антенне, от давления воздуха при различных длительностях СВЧ-импульсов и частоте их следования $f = 40$ Гц.

Видно, что мощность используемого генератора при длительности импульса $\tau = 1.5$ мкс достаточна для создания поверхностного СВЧ-разряда

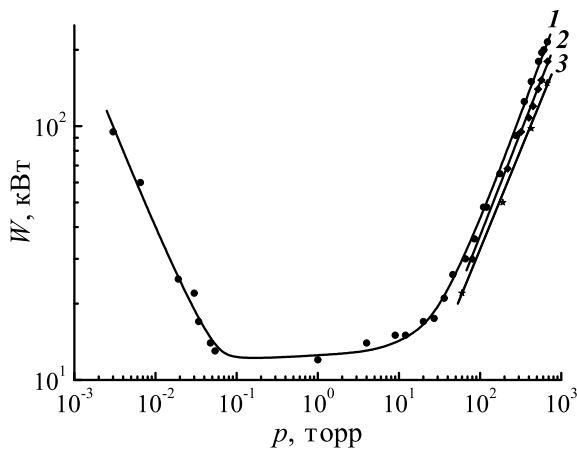


Рис. 1. Пороговые характеристики создания на тefлоновой антенне поверхностного СВЧ-разряда в импульсно-периодическом режиме при различных давлениях воздуха и длительностях СВЧ-импульса τ , мкс: 1 — 1.5; 2 — 5; 3 — 50–100

(кривая 1) при всех исследованных давлениях воздуха. При этом минимальная подводимая мощность, приводящая к образованию поверхностного разряда, вначале при увеличении давления воздуха уменьшается, а затем растет. Полученная зависимость является аналогом кривой Пашена. Такая зависимость мощности от давления объясняется уменьшением диффузионных потерь и увеличением прилипания электронов с увеличением давления. Известно [28], что в воздухе при давлении $p < 1$ торр основным каналом гибели электронов при пробое разрядного промежутка является диффузия, а при $p > 10$ торр — прилипание. Для компенсации потерь электронов требуется большая частота ионизации. Частота ионизации является растущей функцией температуры электронов $\nu_i = f(T_e)$ [с⁻¹], т.е. приведенного электрического поля E/n (E — напряженность электрического поля, n — концентрация молекул) или СВЧ-мощности W . Для воздуха частота диффузионных потерь $\nu_D = 10^5/(\Lambda^2 p)$ [с⁻¹] (где Λ — характерный минимальный размер плазмы) обратно пропорциональна давлению, а частота прилипания электронов $\nu_a = 6 \times 10^4 p$ [с⁻¹] растет с ростом давления. Отсюда для создания поверхностного СВЧ-разряда при малых ($p < 1$ торр) и больших ($p > 10$ торр) давлениях воздуха требуется подводить к антенне большую мощность, что и наблюдается в эксперименте. На рис. 1 также представлены данные по пороговым характеристикам поверхностного разряда, создаваемого при различных длительностях СВЧ-импульса. Экспериментально показано, что при фиксированном давлении воздуха с ростом длительности импульса от 1.5 до 10 мкс мощность, необходимая для образования поверхностного разряда, резко уменьшается, тогда как для $\tau > 50$ мкс порог пробоя почти не зависит от длительности воздействия.

При импульсном включении СВЧ-энергии время нарастания внешнего поля не превышает 10^{-7} с, что много меньше по сравнению с характерным временем возникновения заряженных частиц в плазме 10^{-6} – 10^{-5} с. При этом электрическое поле остается постоянным в течение времени развития лавины

и можно считать, что после включения поля частоты ионизации ν_i , прилипания ν_a и диффузии ν_D не зависят от времени, т.е. $\nu_i(t), \nu_a(t), \nu_D(t) = \text{const}$. Тогда из уравнения баланса для концентрации электронов следует, что при импульсном пробое должно выполняться следующее соотношение

$$\nu_i = \frac{1}{\tau} \ln \frac{n_e}{n_{eo}} + \nu_a + \nu_D, \quad (2)$$

где первый член в правой части уравнения определяет влияние конечной длительности импульса τ на пробойные характеристики, n_e — концентрация электронов, n_{eo} — число затравочных электронов. Оценим частоту ионизации для условий эксперимента [19, 27]: длина волны СВЧ-излучения $\lambda = 2.4$ см, длительность импульса $\tau = 50$ мкс, начальная концентрация электронов в воздухе $n_{eo} = 10^2$ см⁻³, $n_e = 10^{12}$ см⁻³. Так как коэффициент диффузии $D \sim 1/p$, то при низких давлениях воздуха $p < 1$ торр диффузионные потери электронов значительно превышают потери за счет прилипания, частота которого $\nu_a \sim p$. В этом случае $\nu_D > \nu_a$. Для компенсации потерь требуется большая скорость ионизации, т.е. сильное электрическое поле. При этом пороговое поле пропорционально частоте СВЧ-излучения и обратно пропорционально плотности (давлению) газа и размерам разрядного объема [28]. В случае высоких давлений диффузионные потери электронов незначительны и, казалось бы, даже не слишком большое поле, т.е. малая скорость ионизации, могло бы обеспечить пробой. Однако в этом случае на первый план выступают потери электронов за счет прилипания. Они и ограничивают частоту ионизации. При $p = 10$ торр частота прилипания больше частоты диффузии, первое слагаемое в правой части выражения (2) приблизительно равно $4 \cdot 10^5$ с⁻¹, а второе — $6 \cdot 10^5$ с⁻¹, т.е. их сумма равна 10^6 с⁻¹. Отсюда мы видим, что частота ионизации при $p = 10$ торр должна быть не меньше 10^6 с⁻¹, а при атмосферном давлении воздуха больше $\sim 5 \cdot 10^7$ с⁻¹. При этом при расчете порога пробоя при $\tau \leq 50$ мкс необходимо учитывать длительность СВЧ-импульса, что хорошо согласуется с экспериментальными данными (рис. 1).

В процессе существования разряда в плазме протекает ряд процессов, таких как нагрев газа, возбуждение колебательных степеней свободы молекул, накопление долгоживущих метастабильных электронно-возбужденных состояний, накопление заряженных (электронов, положительных и отрицательных ионов) частиц, изменение химического состава газа и ряд других процессов. Все эти процессы в той или иной степени могут приводить к изменению условий вторичного пробоя газа [29, 30]. Так, при разряде в воздухе, создаваемом в режиме повторяющихся импульсов, за время действия каждого импульса газ в зависимости от мощности и длительности СВЧ-импульса нагревается до значительных температур. При этом если период следования импульсов меньше характерного времени остывания газа, то к приходу последующего импульса газ не успевает остыть до температуры окружающей среды. В области существования разряда образуется каверна, т.е. область

с пониженной плотностью газа $n < n_o$ (где n_o — плотность окружающего разряд воздуха). В этом случае для достижения пробойной величины приведенного электрического поля $(E/n)_b$ необходимо приложить меньшее внешнее поле, т.е. мощность, необходимая для повторного пробоя газа, уменьшается. Если рассмотреть поверхностный СВЧ-разряд в сверхзвуковом потоке воздуха, то время t замены окружающей тело среды в фиксированной области пространства равно $t = l/v_f$ и определяется продольным размером l тела и скоростью v_f потока. Оценим эту величину для нашего случая: размер $l = 11$ см, а для $M = 2$ скорость невозмущенного потока $v_f = 520$ м/с, тогда $t \sim 200$ мкс. Период следования импульсов в эксперименте $T = 25\text{--}50$ мс, т.е. к приходу следующего импульса все изменения, возникшие за время действия предыдущего СВЧ-импульса, исчезнут и мощность, необходимая для пробоя газа, не должна зависеть от частоты следования импульсов, что и наблюдается в эксперименте.

2.2. Поверхностный СВЧ-разряд при средних давлениях воздуха [19, 27, 31]

В диапазоне давлений $p = 1\text{--}40$ торр частота столкновений ν_{en} электронов с молекулами газа порядка круговой частоте ω электромагнитного поля (для длины волны $\lambda = 2.4$ см круговая частота $\omega = 2\pi c/\lambda = 7.85 \cdot 10^{10}$ рад/с, частота столкновений $\nu_{en} = 5.3 \cdot 10^9$ рад/с, где c [см/с] — скорость света, p [торр] — давление газа). Равенство частот $\nu_{en} = \omega$ достигается при $p = 15$ торр.

Известно [30–34], что распространение переднего фронта СВЧ-разряда при изменении режима его создания могут обеспечивать различные механизмы, такие как «волна пробоя», амбиполярная диффузия, фотоионизация, теплопроводность (режим медленного горения), электронная теплопроводность. Для выяснения механизма, ответственного за распространение фронта поверхностного сверхвысокочастотного разряда вдоль антенны, определялись линейные размеры поверхностного СВЧ-разряда и скорость его распространения вдоль диэлектрической антенны. Эксперименты проводились при различных значениях подводимой СВЧ-мощности, длительности воздействия и давления воздуха. В качестве примера на рис. 2 представлены фотографии поверхностного СВЧ-разряда, создаваемого на диэлектрической антенне с клинообразной торцевой передней частью в неподвижном воздухе при давлении $p = 40$ торр и различных значениях мощности и длительности СВЧ-импульса. Видно, что разряд при подводимой импульсной мощности 40 кВт локализован в тонком приповерхностном слое толщиной $h = 1$ мм. С увеличением длительности воздействия все большая часть антенны покрывается плазмой, создаваемой поверхностной СВЧ-волной. При этом подводимая мощность 40 кВт обеспечивает почти полное плазменное покрытие антенны при длительности импульса 100 мкс. Дальнейшее увеличение длительности воздействия не приводит к росту продольного размера поверхностного СВЧ-разряда. Как показывают расчеты [35], при неполном покрытии поверхности антенны плазмой коэффициент отражения κ_r ,

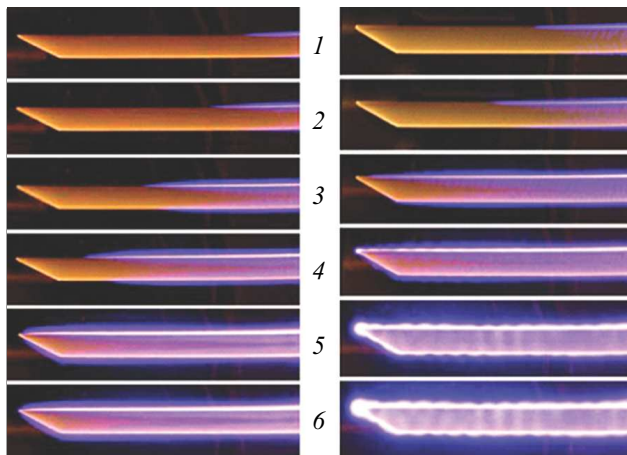


Рис. 2. Динамика поверхностного СВЧ-разряда на диэлектрической антенне при различных длительностях импульса τ , мкс: 1 — 2; 2 — 7; 3 — 25; 4 — 50; 5 — 100; 6 — 150. $W = 40$ кВт (слева), $W = 60$ кВт (справа)

энергии от переднего фронта распространяющегося поверхностного разряда не превышает 0.15. Поэтому в этих условиях не формируется структура стоячей волны и не наблюдается продольная модуляция свечения плазмы.

При увеличении импульсной СВЧ-мощности до 60 кВт плазма полностью покрывает диэлектрическую антенну уже при длительности импульса $\tau = 50$ мкс (рис. 2). В работе [35] показано, что в этих условиях коэффициент отражения поверхностной СВЧ-волны от переднего торца антенны достигает величины $\kappa_r \sim 0.85$. В этом случае на передней кромке антенны начинает формироваться объемное плазменное образование. При дальнейшем увеличении длительности импульса размеры этого образования возрастают. При этом на поверхности антенны формируется режим стоячей волны с характерной пространственной модуляцией свечения. По полученной структуре можно оценить концентрацию электронов в плазме.

При исследовании динамики развития разряда было получено, что в начальные моменты времени $t = 1\text{--}3$ мкс скорость распространения поверхностного СВЧ-разряда в зоне его формирования $z = 1\text{--}2$ см может достигать в зависимости от подводимой мощности величины 30–100 км/с, что на несколько порядков величины превышает скорость звука в воздухе. Такие большие скорости распространения разряда может обеспечить только механизм, связанный с волной пробоя. Наиболее вероятным механизмом, обеспечивающим распространение разряда при низких давлениях газа на квазистационарной стадии его существования $t > 3$ мкс, может быть амбиполярная диффузия, тогда как фотоионизация и/или электронная теплопроводность могут быть ответственны за распространение разряда при высоких давлениях. Для того чтобы определить, изменяется ли механизм распространения разряда в течение его формирования и развития, измерялась скорость движения переднего фронта разряда в зависимости от длины поверхностного СВЧ-разряда. Для этого в двойном логарифмическом масштабе была построена зависимость скорости распространения

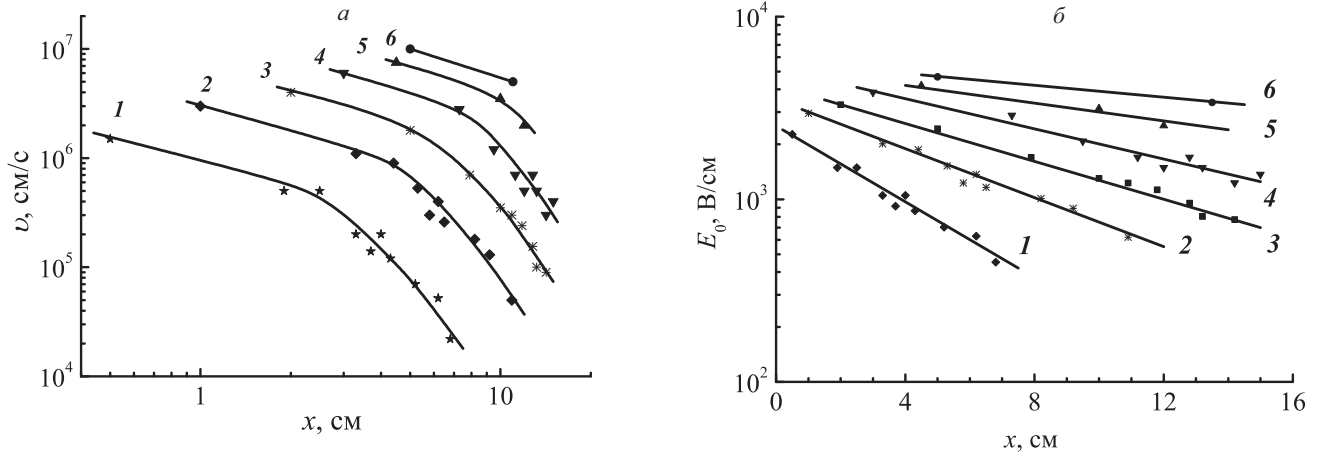


Рис. 3. *a* — Зависимость скорости распространения разряда от продольной координаты для $p = 10$ торр и СВЧ-мощности W , кВт: 1 — 25; 2 — 35; 3 — 55; 4 — 75; 5 — 100; 6 — 175; *б* — зависимость амплитуды напряженности электрического поля на фронте распространения поверхностной волны от продольной координаты для $p = 10$ торр и W : 1 — 25; 2 — 35; 3 — 55; 4 — 75; 5 — 100; 6 — 175 кВт

разряда вдоль диэлектрической антенны от продольной координаты (x). На рис. 3, *a* представлены построенные таким образом зависимости $v = f(x)$. Как видно, на всех кривых наблюдается характерный излом, который указывает на то, что на начальной и конечной стадиях существования разряда за его распространение отвечают различные механизмы.

Предположим, что основным механизмом распространения разряда является амбиполярная диффузия. Известно, что температура электронов в области переднего фронта поверхностного СВЧ-разряда практически не меняется в процессе его распространения, поэтому в пределах погрешностей эксперимента ее изменением можно пренебречь. На переднем фронте разряда $T_e = 2$ эВ, $T_i = T_g = 300$ К. Если амбиполярная диффузия является основным механизмом, определяющим потери заряженных частиц в плазме, то зависимость скорости v распространения поверхностного разряда от частоты ионизации ν_i определяется формулой

$$v = 2\sqrt{D_a\nu_i}, \quad (3)$$

где D_a — коэффициент амбиполярной диффузии, равный

$$D_a = \frac{\mu_i k T_e}{e}, \quad (4)$$

где k — постоянная Больцмана, μ_i — подвижность ионов, которая для воздуха в [28] определена как

$$\mu_i p = \frac{2.7 \cdot 10^4 \sqrt{1 + M_g/M_i}}{\sqrt{(\alpha/a_0^3)A}}, \quad (5)$$

здесь p — давление газа в торр, $\alpha/a_0^3 = 11.54$, M_g и M_i — массы одной молекулы и ее иона, A — молекулярная масса.

В работе [36] для сверхвысокочастотного пробоя воздуха представлена зависимость частоты ионизации от величины приведенного электрического поля

$$\frac{\nu_i}{p} = 8.35 \cdot 10^{-4} \left(\frac{E_{\text{ef}}}{p} \right)^{5.34}, \quad (6)$$

где E_{ef} — эффективное поле, связанное со значением E_0 амплитуды напряженности электрического поля выражением

$$E_{\text{ef}} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \frac{\nu_{en}}{\sqrt{\nu_{en}^2 + \omega^2}}. \quad (7)$$

Используя уравнения (3)–(7) для давления воздуха $p = 10$ торр, получаем зависимость амплитуды напряженности электрического поля от скорости распространения СВЧ-разряда:

$$E_0 = 45.3 \cdot v^{0.375}, \quad (8)$$

где размерности напряженности электрического поля В/см, а скорости — м/с.

На рис. 3, *б* в полулогарифмическом масштабе представлены для давления воздуха 10 торр зависимости амплитуды напряженности электрического поля на фронте распространяющегося поверхностного разряда от продольной координаты x , вычисленные с использованием экспериментально измеренных зависимостей скорости распространения разряда вдоль антенны. Параметром кривых является подводимая импульсная СВЧ-мощность. Аппроксимируя полученные зависимости к координате $x = 0$, получаем, что в условиях эксперимента амплитуда напряженности электрического поля на фронте поверхностного СВЧ-разряда у среза волновода изменяется от 2 кВ/см при импульсной мощности 25 кВт до ~6 кВ/см при $W = 175$ кВт. Следует отметить, что полученные результаты удовлетворительно совпадают с величиной поля в волноводе, вычисленной по формуле $E_0 = 28\sqrt{S}$, где размерности плотности потока мощности S — Вт/см², а амплитуды напряженности электрического поля E_0 — В/см. Для более высоких давлений были получены результаты, явно противоречащие экспериментальным условиям. Так, например, для давления 100 торр амплитуда напряженности электрического поля в поверхностном разряде, рассчитанная в приближении распространения разряда за счет амбиполярной диффузии по формуле $E_0 = 259 \cdot v^{0.375}$, достигает 15 кВ/см, что противоречит вычисленным значениям поля в волноводе.

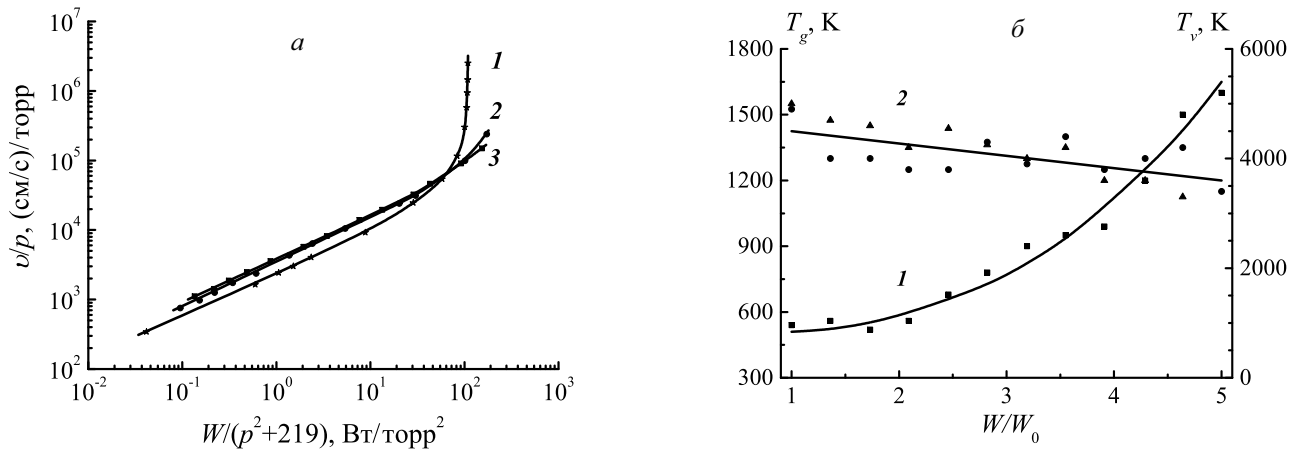


Рис. 4. *a* — Зависимости от мощности газовой (1) и колебательной (2) температур при $p = 40$ торр, $\tau = 50$ мкс, $f = 40$ Гц, $x = 2.5$ см; *б* — временной ход температуры газа в плазме поверхностного СВЧ-разряда в сечение с координатой $z = 2.5$ см (точки — эксперимент при $p = 10$ торр, $W = 80$ кВт, пунктирная кривая — расчет для $E/n = 1.5 \cdot 10^{-15}$ В·см²)

За распространение разряда может отвечать механизм электронной теплопроводности [28]. Однако оценки показывают [31], что при $p = 100$ торр и $\nu = 10^5$ м/с максимальная амплитуда поля, рассчитанная по формуле $E_0 = 1.46 \cdot 10^{-5} \sqrt{p\nu}$ в предположении, что распространение разряда обеспечивается за счет электронной теплопроводности, равна 14.6 В/см. Это явно не соответствует экспериментальным условиям, следовательно механизм электронной теплопроводности не обеспечивает распространение поверхностного СВЧ-разряда.

В различных сечениях поверхностного разряда были измерены зависимости газовой и колебательной температур от подводимой к антенне импульсной микроволновой мощности. На рис. 4, *a* представлены зависимости от мощности газовой и колебательной температур в плазме поверхностного СВЧ-разряда в сечении с продольной координатой $x = 2.5$ см. Температура газа измерялась по вращательной структуре полосы (0;2) второй положительной системы азота. Колебательная температура измерялась по молекулярным полосам второй положительной системы азота (кружочки) и по молекулярным полосам циана (треугольники). Из приведенных результатов видно, что с ростом надпороговости $\delta = W/W_0$ (где W — подводимая к антенне импульсная СВЧ-мощность, W_0 — пороговая мощность, необходимая для пробоя и возникновения поверхностного разряда в данных условиях) температура газа увеличивается от ~ 500 К при $\delta = 1$ до ~ 1600 К при $\delta = 5$, тогда как колебательная температура остается при этих условиях практически неизменной, незначительно уменьшаясь с увеличением мощности. При исследовании продольного распределения нагрева газа было получено, что максимальный нагрев наблюдается в месте возбуждения поверхностного СВЧ-разряда и температура газа уменьшается по длине антенны.

Результаты измерений временного хода температуры газа в сечение разряда с продольной координатой $x = 2.5$ см приведены на рис. 4, *б*. Видно, что на начальной стадии существования поверхностного СВЧ-разряда наблюдается быстрый нагрев газа со скоростью нагрева $dT_g/dt \sim 50$ К/мкс. На этом же рисунке пунктирной кривой изображены результаты

математического моделирования нагрева газа. В расчетах использовалась нестационарная кинетическая модель, разработанная в [30, 37–39] для изучения кинетики перераспределения энергии между различными компонентами и степенями свободы в молекулярной плазме свободно локализованного СВЧ-разряда, создаваемого в воздухе сфокусированным пучком электромагнитного излучения. Кинетическая модель включает в себя уравнение Больцмана для функции распределения электронов по энергиям, систему нестационарных газокинетических уравнений баланса для заселенностей колебательных уровней основного и электронно-возбужденных состояний азота и кислорода, для концентраций активных и заряженных частиц, образующихся в плазме, нестационарное уравнение теплопроводности для температуры газа. Модель учитывает различные процессы, приводящие к нагреву газа, такие, как передача энергии в поступательные степени свободы при упругих ударах электронов с молекулами, вращательно-поступательная и колебательно-поступательная релаксации, колебательно-колебательный обмен и тушение электронно-возбужденных состояний молекул. Численные расчеты показывают, что за быстрый нагрев газа ответствен механизм, связанный с эффективным возбуждением при больших значениях приведенного электрического поля $E/n \geq 10^{-15}$ В·см² электронно-возбужденных состояний молекул азота с последующим их тушением. При этом часть энергии возбуждения этих состояний передается в тепло, что и обеспечивает наблюдаемый быстрый нагрев газа в плазме поверхностного СВЧ-разряда в воздухе.

2.3. Поверхностный СВЧ-разряд при высоких давлениях воздуха [40, 41]

При высоких, вплоть до атмосферного, давлениях воздуха $p > 40$ торр частота столкновений электронов с нейтральными молекулами много больше круговой частоты электромагнитного поля $\nu_{en} \gg \omega$. При этом поверхностный разряд представляет собой сложную систему, состоящую из тонких ветвящихся плазменных каналов, диаметром от 0.1 мм до 1 мм в зависимости от давления газа, длительности воздействия и подводимой СВЧ-мощности.

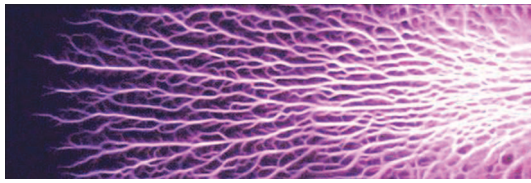


Рис. 5. Фотография СВЧ-разряда на внешней поверхности кварцевой антенны при $p = 760$ торр, $\tau = 10$ мкс, $W = 70$ кВт. Направление распространения поверхностной волны — слева направо

С целью применения поверхностного СВЧ-разряда в различных областях сверхзвуковой плазменной аэродинамики необходимо оптимизировать режимы его создания [16, 19–21, 26, 42, 43]. В [27] экспериментально показано, что для создания поверхностного СВЧ-разряда на тефлоновой антенне в диапазоне давлений воздуха 0.1–50 торр требуется импульсная мощность 10–20 кВт, тогда как при атмосферном давлении необходимая для инициации поверхностного СВЧ-разряда мощность составляет величину порядка 250 кВт. С целью снижения уровня импульсной мощности необходимо было разработать новую систему инициации поверхностного СВЧ-разряда. Известно [30, 44], что если разряд инициировать каким-либо способом, то он будет существовать длительное время при мощностях много меньших, чем мощности, требуемые для первоначального пробоя газа. Существует множество способов инициации СВЧ-разряда, например лазерная искра; искровой разряд; облучение вакуумным ультрафиолетовым излучением области, где планируется создать разряд; использование различных металлических проволочек, диполей и т. д. Однако для инициации СВЧ-разряда наиболее эффективен контакт металл–диэлектрик [44]. В [27] при создании поверхностный СВЧ-разряд на тефлоновой антенне контакт металл–диэлектрик конструктивно был вынесен из области сильного электрического поля, что требовало высоких значений подводимой мощности для создания поверхностного СВЧ-разряда при высоких давлениях воздуха. Поэтому в дальнейших экспериментах был изменен узел подвода СВЧ-энергии к антенне, а также тефлоновая антенна была заменена на кварцевую. Это позволило технологически осуществить контакт кварцевой антенны с широкой стенкой металлического волновода, где для волны типа H_{01} амплитуда напряженности электрического поля максимальна. Используемая нами система подвода энергии (металлический волновод — кварцевая антенна) позволила существенно снизить с 250 кВт до 20 кВт импульсную мощность, необходимую для создания поверхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении воздуха. Следует обратить внимание на тот факт, что импульсной СВЧ-мощности 20 кВт соответствует амплитуда напряженности электрического поля $E_0 = 2.7$ кВ/см, что значительно меньше поля 30 кВ/см, необходимого для самостоятельного пробоя атмосферного воздуха.

На рис. 5 представлена фотография СВЧ-разряда на внешней поверхности кварцевой антенны при атмосферном давлении воздуха. Фотография поверхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении

воздуха внешне похожа на фотографию инициированного СВЧ-разряда, создаваемого сфокусированным пучком электромагнитного излучения в свободном пространстве. В обоих случаях СВЧ-разряды представляют собой систему тонких плазменных каналов. Однако свободно локализованный инициированный СВЧ-разряд, формируемый в фокальной области каустики сфокусированного пучка электромагнитной энергии, представляет собой некое объемное неоднородное плазменное образование [12, 30, 44]. Поверхностный СВЧ-разряд существует на диэлектрической антенне и не выходит за пределы тонкого ($h = 0.1$ – 1.0 мм) приповерхностного слоя. В этих условиях разряд представляет собой систему тонких ветвящихся плазменных каналов, возникающих на поверхности диэлектрической антенны. Существование СВЧ-разряда при высоких давлениях в виде ярко светящихся плазменных каналов связано с развитием различных неустойчивостей (ионизационно-полевой [45], а также ионизационно-перегревной [46]).

В отличие от свободно локализованного СВЧ-разряда, создаваемого в сфокусированном пучке электромагнитного излучения и распространяющегося навстречу подводимой энергии, плазменные каналы поверхностного СВЧ-разряда, формирующиеся в области подвода энергии, начинают развиваться по направлению распространения микроволновой энергии. В этом случае электрическое поле существует и на фронте, и за фронтом распространяющегося вдоль поверхности антенны разряда. После прохождения переднего фронта поверхностного СВЧ-разряда любого сечения антенны с координатой $x = x_1$ плазма продолжает существовать в этих областях, пока к антенне подводится электромагнитная энергия. Поэтому в сечении с координатой $x = x_1$ энергия подводится в течение большего времени, по сравнению с областью с координатой $x = x_2 > x_1$. При этом электромагнитная энергия на фронте поверхностного СВЧ-разряда вкладывается в течение меньшего времени, по сравнению со временем, в течение которого энергия подводится к областям пространства за фронтом движущегося разряда, в частности в зоне его возникновения. Поэтому, как показано в [18], в областях с меньшей продольной координатой x газ нагревается до больших температур.

В [40] было исследовано, как трансформируется общий вид поверхностного СВЧ-разряда при изменении давления воздуха. Для этого разряд создавался на кварцевой антенне, помещенной в вакуумную стеклянную камеру, в которой давление воздуха изменялось от 1 до 760 торр. В качестве примера на рис. 6 представлены фотографии поверхностного СВЧ-разряда при фиксированных значениях импульсной СВЧ-мощности $W = 78$ кВт, длительности импульса $\tau = 5$ мкс и различных давлениях воздуха. Видно, что при низких давлениях воздуха меньше 30 торр и подводимой импульсной мощности 78 кВт за длительность импульса $\tau = 5$ мкс разряд успевает полностью покрыть всю поверхность антенны. Увеличение давления воздуха при фиксированной мощности приводит к тому, что значение приведенно-

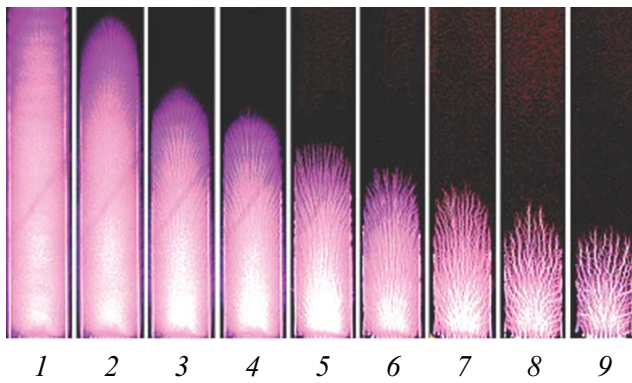


Рис. 6. Общий вид СВЧ-разряда на внешней поверхности широкой стенки кварцевой антенны при различных давлениях воздуха p , торр: 1 — 20; 2 — 30; 3 — 40; 4 — 50; 5 — 100; 6 — 150; 7 — 300; 8 — 500; 9 — 750. Направление распространения поверхностной волны — снизу вверх

го электрического поля E/N уменьшается, что ведет к уменьшению продольной скорости распространения разряда и за время 5 мкс разряд не успевает покрыть всю поверхность антенны. В [40] исследована динамика развития поверхностного СВЧ-разряда при давлении воздуха $p = 760$ торр. Эксперименты проводились при различных значениях подводимой СВЧ-мощности и времени воздействия. Процесс развивается во времени так, что плазма возникает в отдельных областях пространства на границе контакта широкой стенки металлического волновода с диэлектрической антенной, где происходит первоначальный пробой газа. От этих областей начинают развиваться тонкие плазменные каналы, распространяющиеся в основном в продольном направлении. С течением времени происходит ветвление каналов и скорость их распространения вдоль антенны уменьшается. По мере увеличения времени воздействия происходит нагрев газа в областях пространства, где существуют плазменные каналы. Особенно эффективно газ нагревается в зоне подвода электромагнитной энергии к антенне. Нагрев газа приводит к увеличению поперечных размеров каналов. Вокруг каналов образуется также светящийся плазменный ореол. При фиксированной длительности импульса с увеличением подводимой мощности СВЧ-разряд занимает большую площадь поверхности антенны, его продольные размеры увеличиваются, возрастает также степень размытия плазменных каналов. В [40] показано, что для фиксированного момента времени линейные размеры поверхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении воздуха растут с увеличением подводимой СВЧ-мощности, при этом при всех значениях мощности изменение продольного размера разряда в начале воздействия происходит намного быстрее, чем на квазистационарной стадии его существования. В начале воздействия в зависимости от подводимой мощности разряд распространяется с высокой скоростью порядка 10–30 км/с, поэтому его легко можно создавать в сверхзвуковых потоках газа. С течением времени скорость распространения разряда постепенно уменьшается. Это связано с тем, что в зоне подвода микроволновой энергии к антенне напряженность электрического поля макси-

мальна. По мере развития разряда часть подводимой к антенне СВЧ-мощности тратится на поддержание плазмы и нагрев газа в областях пространства, остающихся после прохождения переднего фронта поверхностной волны. Плотность потока мощности на фронте распространяющегося разряда уменьшается. Это ведет к уменьшению величины приведенного электрического поля, что, соответственно, приводит к падению скорости движения переднего фронта разряда к концу СВЧ-импульса.

Как показано в [19, 31], скорость распространения поверхностного СВЧ-разряда при средних давлениях воздуха определяется механизмом амбиполярной диффузии. Помимо амбиполярной диффузии существует другой механизм, впервые предложенный при изучении свойств разряда, создаваемого сфокусированным излучением оптического квантового генератора, и названный в [32, 47] «волной пробоя». В этом случае граница светящейся плазменной области движется по направлению к фокусирующей линзе. Волна пробоя обеспечивает также распространение свободно локализованных разрядов, создаваемых пучком мощного сфокусированного СВЧ-излучения [30, 44]. В наших условиях этот механизм также может приводить к видимому движению границы плазменной области вдоль антенны, но уже по направлению распространения СВЧ-мощности. В случае когда за распространение разряда отвечает волна пробоя, скорость возникновения плазмы зависит от плотности потока мощности S . Время достижения концентрации электронов определенной величины, при которой уже можно наблюдать свечение плазмы, тем меньше, чем больше S . Так как плотность потока мощности в условиях поверхностного СВЧ-разряда уменьшается по направлению распространения подводимой электромагнитной энергии, то в областях антенны, более удаленных от границы подвода СВЧ-мощности, уровень критической концентрации электронов достигается позже во времени. Это приводит к видимому распространению передней границы поверхностного СВЧ-разряда.

Если основным механизмом, обеспечивающим распространение разряда, является волна пробоя, то скорость v распространения поверхностного разряда должна быть прямо пропорциональна частоте ионизации $\nu_i = 3.56 \cdot 10^{16} p k_i$. Константа скорости ионизации k_i является растущей функцией приведенного электрического поля $k_i \sim (E_{ef}/p)^\alpha$, где E_{ef} — эффективное поле, связанное со значением E_0 амплитуды напряженности электрического поля выражением (7). Поставляя в формулу (7) численные значения для круговой частоты сверхвысокочастотного поля для экспериментальных условий $\lambda = 2.4$ см и частоты $\nu_{en} = 5.3 \cdot 10^9 p$ столкновений электронов с нейтральными молекулами воздуха, получаем выражение для приведенного электрического поля:

$$\frac{E_{ef}}{p} \sim \frac{E_0}{\sqrt{p^2 + 219}}. \quad (9)$$

Так как амплитуда напряженности электрического поля $E_0 = 28\sqrt{S}$ (где $S = W/s$ — плотность потока мощности, W — подводимая СВЧ-мощность,

s — площадь поперечного сечения волновода), то для скорости распространения поверхностного СВЧ-разряда получаем следующую зависимость:

$$\frac{v}{p} = A \left(\frac{W}{p^2 + 219} \right)^{\frac{\alpha}{2}}, \quad (10)$$

где величина A слабо (логарифмически) зависит от коэффициента поглощения СВЧ-мощности в плазме и закона убывания плотности потока мощности вдоль антенны. Предполагая, что $A = \text{const}$, зависимость приведенной скорости v/p от приведенной мощности $W/(p^2 + 219)$ должна быть линейной функцией в двойном логарифмическом масштабе.

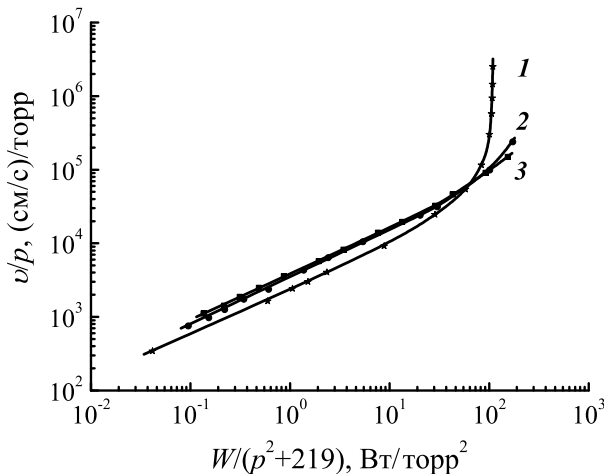


Рис. 7. Зависимость приведенной скорости v/p распространения поверхностного СВЧ-разряда от величины $W/(p^2 + 219)$ при W , кВт: 1 — 24; 2 — 55; 3 — 78

Полученные в эксперименте при различных значениях подводимой к антенне импульсной СВЧ-мощности зависимости представлены на рис. 7. Видно, что в широком диапазоне изменения приведенной мощности от 10^{-2} до 10^2 Вт/торр² приведенная скорость v/p линейно зависит от величины $W/(p^2 + 219)$. Это указывает на то, что в этих условиях одним из основных механизмов распространения вдоль антенны поверхностного СВЧ-разряда является волна пробоя. При подводимой импульсной мощности 24 кВт отступление полученной зависимости от прямой начинает наблюдаться при давлении $p < 50$ торр. Это связано с тем, что при низких давлениях механизм амбиполярной диффузии обеспечивает при данной подводимой мощности большую скорость распространения разряда по сравнению с волной пробоя. С увеличением подводимой мощности заметный вклад амбиполярной диффузии начинает проявляться при меньших давлениях воздуха. Так, при $W = 78$ кВт волна пробоя является главным механизмом, обеспечивающим продольное распространение поверхностного СВЧ-разряда, при давлениях воздуха $p > 20$ торр.

В [41] исследована эволюция газодинамических возмущений, возникающих в условиях поверхностного микроволнового разряда при высоких давлениях воздуха. Для регистрации эволюции ударных волн и области с пониженной плотностью газа использовались оптические рефракционные датчики,

функционирование которых основано на принципе отклонения лазерного луча на скачках плотности нейтрального газа и подробно описано в [42]. Для визуализации ударных волн, возникающих в области существования поверхностного СВЧ-разряда в воздухе, применялась также импульсная теневая установка. С помощью теневой картины определялись положение и скорость распространения ударных волн, генерируемых разрядом, а также положение, размеры и скорость распространения областей с пониженной плотностью газа. Так как в условиях поверхностного СВЧ-разряда электрическое поле локализовано в тонком ($h \sim 1$ мм) слое вблизи антенны, то газ в приповерхностных областях в первые 10–20 мкс развития разряда быстро нагревается со скоростью 30–70 К/мкс. При этом скорость нагрева воздуха растет с увеличением плотности потока подводимой мощности, т.е. с увеличением приведенного значения электрического поля. По мере развития разряда электрическое поле и соответственно этому скорость нагрева газа уменьшаются и к концу СВЧ-импульса длительностью 100 мкс температура газа достигает величины 1500–2000 К в зависимости от подводимой мощности. Быстрый нагрев газа приводит к тепловому взрыву вблизи поверхности антенны, поэтому формирование разряда сопровождается генерацией ударных волн. На поздних стадиях в области существования разряда образуется зона пониженной плотности нагретого слабоионизованного газа. Показано, что вблизи антенны скорость ударной волны достигает 1 км/с, по мере удаления от антенны она постепенно падает, приближаясь к звуковой скорости.

Концентрация электронов в канальной плазме поверхностного СВЧ-разряда в воздухе при атмосферном давлении измерялась по уширению спектральной линии H_{β} бальмеровской серии водорода. Получено, что n_e порядка 10^{15} – 10^{16} см⁻³ в зависимости от подводимой СВЧ-мощности. Высокий уровень концентрации электронов в плазме поверхностного СВЧ-разряда подтверждается наличием в спектре интенсивной полосы (0;0) первой отрицательной системы молекулярного иона азота.

2.4. Поверхностный СВЧ-разряд при низких давлениях воздуха [18]

При давлениях воздуха от 1 мторр до 5 торр частота столкновений электронов с молекулами газа много меньше круговой частоты электромагнитного поля $\nu_{en} \ll \omega$. В этих условиях поверхностный СВЧ-разряд представляет собой однородное плазменное образование большого объема. Внешний вид разряда на поверхности кварцевой антенны при различных давлениях воздуха представлен на рис. 8. В эксперименте поддерживались постоянными длительность импульса $\tau = 100$ мкс и импульсная СВЧ-мощность $W = 55$ кВт. Видно, что в рассматриваемых условиях разряд покрывает всю поверхность антенны, причем в поперечном направлении его размер растет с уменьшением давления воздуха и достигает величины порядка 10 см при давлении воздуха $p = 10^{-3}$ торр.

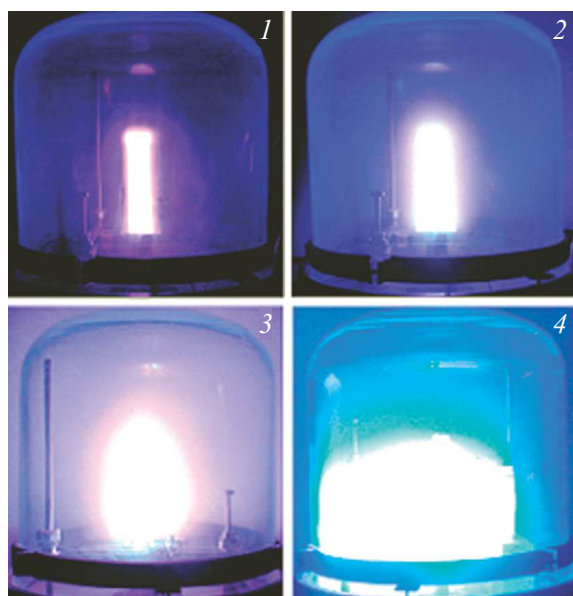


Рис. 8. Поверхностный СВЧ-разряд на кварцевой антенне при различных давлениях воздуха, p : 1 — 5; 2 — 1; 3 — 0.5; 4 — 10^{-3} торр. Вверху (1 и 2) — вид перпендикулярно поверхности широкой стенке, внизу (3 и 4) — вид параллельно поверхности антенны

Были измерены временные зависимости продольной и поперечной скоростей распространения поверхностного разряда при различных значениях СВЧ-мощности и давления воздуха. Получено, что с увеличением длительности воздействия поперечные размеры плазмы увеличиваются при всех исследованных давлениях. При фиксированной длительности СВЧ-импульса эти размеры возрастают при уменьшении давления воздуха. Например, к концу СВЧ-импульса длительностью 100 мкс при давлении 20 торр плазма локализована в тонком ($h \sim 2\text{--}3$ мм) слое вблизи поверхности антенны, тогда как при давлении 1 мторр плазма занимает пространство с поперечным размером до 100 мм от поверхности антенны. При этом поперечные размеры разряда незначительно увеличиваются с ростом мощности. Так, при увеличении мощности почти в четыре раза от 15 до 55 кВт поперечные размеры плазмы возрастают всего на 30 %. В условиях поверхностного СВЧ-разряда при низких давлениях воздуха амбиполярная диффузия является доминирующим механизмом гибели заряженных частиц в плазме. Поперечный размер L плазмы, достигаемый к моменту времени t , определяется выражением: $L = \sqrt{D_a t}$, где D_a — коэффициент амбиполярной диффузии. Например, для $p = 0.5$ торр, $T_e \sim 2$ эВ и $\tau = 100$ мкс получаем $L \sim 4$ см, что удовлетворительно согласуется с экспериментально полученными поперечными размерами поверхностного СВЧ-разряда в этих условиях.

На рис. 9, а представлены временные зависимости продольной и поперечной скоростей распространения поверхностного разряда при давлении воздуха 0.5 торр и подводимой импульсной мощности 35 кВт. Видно, что продольная скорость распространения разряда сильно (в условиях эксперимента на два порядка величины) изменяется в течение длительности СВЧ-импульса, тогда как поперечная скорость

распространения поверхностного разряда остается практически постоянной, уменьшаясь к концу импульса только в три раза. При этом на начальных стадиях развития разряда продольная скорость более чем на порядок величины превышает поперечную скорость, а на поздних стадиях существования разряда продольная и поперечные скорости с хорошей степенью точности равны друг другу. Эти факты указывают, что на поздних стадиях за продольное и поперечное развитие разряда отвечает один и тот же механизм. Очевидно, что при низких давлениях воздуха таким механизмом может быть только амбиполярная диффузия.

Экспериментально измерялось продольное распределение $T_g(x)$ температуры газа в конце СВЧ-импульса длительностью 100 мкс при низких давлениях воздуха и пороговых величинах подводимой микроволновой мощности. Получено, что на расстоянии $x = 0.5$ см от конца волновода и на расстоянии $y = 0.5$ см от поверхности антенны температура газа увеличивается с ростом давления воздуха. Так, при $p = 0.01$ торр газ незначительно нагревается до 350 К, тогда как при $p = 0.1$ торр $T_g = 500$ К, при $p = 1$ торр $T_g = 900$ К, при $p = 10$ торр $T_g = 1200$ К. При этом температура газа в направлении распространения разряда незначительно уменьшается. Это определяется тем, что при малых мощностях поверхностный СВЧ-разряд не доходит до переднего торца антенны. В этом случае коэффициент отражения поверхностной волны от переднего фронта распространения разряда не превышает 15%. Напряженность электрического поля и концентрация электронов уменьшаются в направлении распространения разряда. Соответственно этому температура газа также уменьшается в этом направлении. При увеличении СВЧ-мощности продольное распределение температуры газа сглаживается. Это определяется тем, что с ростом мощности продольная скорость распространения поверхностного микроволнового разряда увеличивается и плазма покрывает всю поверхность антенны. При этом коэффициент отражения поверхностной волны от переднего торца антенны достигает величины $R \sim 85\%$. В этих условиях подводимая к газу на единицу длины разряда энергия остается постоянной по длине антенны, что обеспечивает однородное прогревание газа.

Были проведены измерения временных зависимостей температуры газа в различных сечениях поверхностного СВЧ-разряда в воздухе при давлении $p = 10$ торр и различных значениях подводимой импульсной мощности. Показано, что температура газа увеличивается с ростом подводимой СВЧ-мощности. При этом максимальный нагрев наблюдается в месте возбуждения поверхностного СВЧ-разряда. С увеличением продольной координаты нагрев газа уменьшается. Была измерена также скорость нагрева газа в различные моменты времени существования поверхностного СВЧ-разряда при давлении воздуха 10 торр на расстоянии $x = 2.5$ см от места подвода микроволновой энергии к антенне. Получено, что на стадии формирования разряда в области фронта распространения поверхностного СВЧ-разряда скорость нагрева газа растет с увели-

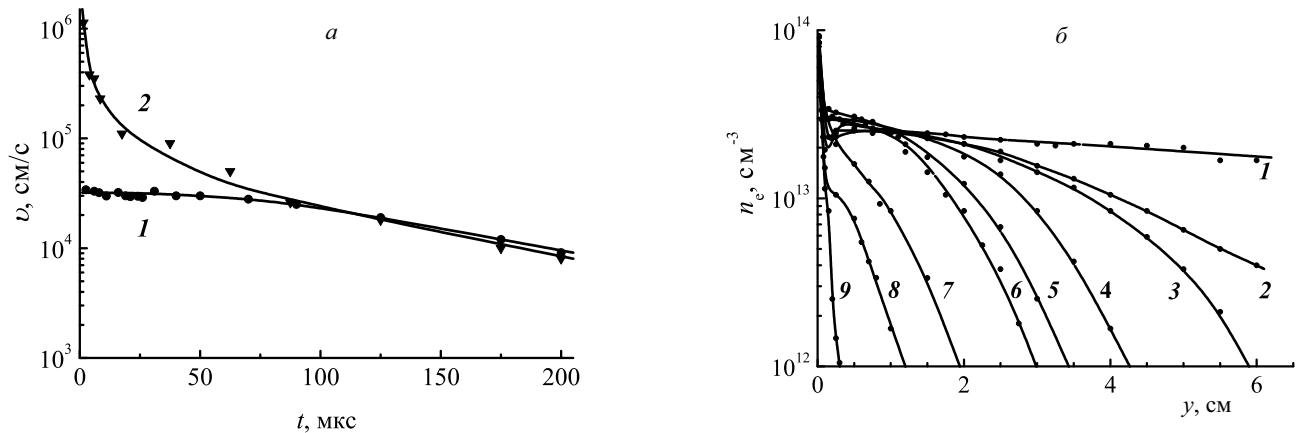


Рис. 9. а — Временные зависимости поперечной (1) и продольной (2) скоростей развития поверхностного СВЧ-разряда; б — поперечное распределение концентрации электронов в плазме поверхностного СВЧ-разряда при различных давлениях воздуха, p : 1 — 0.1; 2 — 0.2; 3 — 0.3; 4 — 0.5; 5 — 1; 6 — 2; 7 — 5; 8 — 10; 9 — 20 торр

чением подводимой к антенне мощности и достигает величины ~ 70 К/мкс. На квазистационарной стадии существования разряда скорость нагрева газа равна 9 К/мкс и не зависит от подводимой мощности. Проведенное математическое моделирование процесса нагрева газа показывает, что только тушение электронно-возбужденных долгоживущих состояний молекулы азота, которые эффективно возбуждаются в условиях поверхностного СВЧ-разряда в воздухе, с последующей передачей части энергии возбуждения в поступательные степени свободы газа обеспечивает полученную в эксперименте скорость нагрева газа [30, 37–39].

Для измерения концентрации электронов в области низких давлений воздуха применялся зондовый метод. В этом случае необходимо принять во внимание две особенности исследуемого поверхностного СВЧ-разряда. Во-первых, чрезвычайно высокую концентрацию электронов в разрядной области, так как $n_e > n_{ec} \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для используемой длины волны СВЧ-излучения. Во-вторых, низкое давление газа, в целом благоприятное для применения классической методики зонда Ленгмюра, приводит в исследуемом случае к двум другим проблемам. Так как при уменьшении давления воздуха напряженность электрического поля, необходимая для создания поверхностного СВЧ-разряда, растет, то воздействие сильного СВЧ-поля на зондовый слой в силу нелинейности последнего приводит к эффекту детектирования и появлению добавочного тока, искажающего истинную вольт-амперную характеристику зонда. Вторая особенность связана с тем, что при концентрациях электронов $n_e > 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и давлении воздуха $p = 1\text{--}100$ мторр степень ионизации плазмы $\alpha = n_e/N \geq 10^{-3}$. Поэтому существенный вклад в сечение упругих столкновений могут вносить кулоновские столкновения. Более того, описание электронного и ионного токов не может быть независимым, как в классическом случае, что усложняет ситуацию.

Для минимизации этих особенностей удобнее всего применить двойной зонд. Поскольку влияние СВЧ-поля разряда имеет место только в области нелинейности вольт-амперной характеристики зонда, а ионные части линейны, искажения возможны

только в переходной области. Она формируется электронной ветвью в области потенциалов порядка плавающего потенциала, где эффект детектирования сказывается существенно слабее, чем вблизи потенциала пространства [18, 48]. Простой и эффективный путь минимизации остающихся искажений — увеличение рабочей площади зонда. При низких давлениях газа это можно сделать за счет увеличения диаметра зонда. Увеличение ограничено известным критерием $\lambda_e \gg a$, где λ_e — длина свободного пробега электронов, a — радиус зонда. Численные расчеты показывают, что пренебрежение столкновениями возможно при $\lambda_e/a \geq 10^2$, а радиус зонда в условиях эксперимента может быть увеличен до миллиметра. Дополнительное преимущество такого решения связано с тем, что увеличение диаметра зонда в условиях высокой плотности заряженных частиц позволяет реализовать режим, близкий к режиму ионного тока насыщения. Это позволяет обоснованно использовать для нахождения концентрации ионов простую асимптотическую формулу Бома [49], полученную в пределе: $a \gg r_D$, где r_D — электронный дебаевский радиус. Численные расчеты [50] приводят к следующей оценке $a/r_D \geq 10^2$. Тогда для условий нашего эксперимента при $n_e \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $T_e \sim 2\text{--}5$ эВ получаем для радиуса зонда $a \sim 1$ мм. Таким образом, оценки показывают, что в эксперименте желательно применение зондов диаметром не менее миллиметра. Однако для того чтобы применять к двойному зонду теорию ионного тока на одиночный зонд, необходимо, чтобы взаимовлияние зондов было минимальным. На практике это достигается удалением зондов на расстояние не менее нескольких диаметров зонда. В эксперименте [18] использованы симметричные зонды с диаметром, равным 1 мм, длиной рабочей части 10 мм и расстоянием между центрами зондов в 5 мм. Для того чтобы не ухудшить пространственное разрешение в направлении сканирования, плоскость размещения зондов устанавливается параллельно плоскости антенны. Измерения проводились при давлении воздуха 1 мторр. Расстояние от двойного зонда до поверхности антенны $y = 2$ см. Диаметр зондов $d = 1$ мм. Температура электронов, определенная из полученной в этих условиях вольт-амперной харак-

теристики, — $T_e \sim 5$ эВ, а концентрация электронов $n_e = 7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Для измерения концентрации заряженных частиц в эксперименте использовался также одиночный электрический зонд длиной $l = 1.1$ см с диаметром рабочей части $d = 1$ мм. Зонд размещался параллельно поверхности широкой стенки антенны и мог перемещаться в направлении перпендикулярно к поверхности антенны на расстояние от 1 мм до 6.5 см. В качестве противозонда использовалась медная пластина площадью 100 см^2 , помещенная в разряд в области подвода СВЧ-энергии. Для получения информации о виде функции распределения электронов по энергиям в нестационарной неравновесной плазме поверхностного СВЧ-разряда при низких давлениях воздуха выполнялось графическое двойное дифференцирование электронной части вольтамперной характеристики одиночного зонда. Проведено сравнение полученной таким способом функции распределения электронов по энергиям в плазме поверхностного СВЧ-разряда в воздухе с функцией распределения Максвелла с температурой $T_e = 2.1$ эВ и рассчитанной с использованием нестационарного однородного кинетического уравнения Больцмана [30] функцией распределения электронов по энергиям с той же электронной температурой. На экспериментально измеренной функции наблюдаются две характерные особенности. При низких энергиях электронов $\epsilon = 2\text{--}6$ эВ функция распределения имеет характерный для молекулярных газов вид с областью сильного влияния колебательного резервуара энергии. При высоких энергиях $\epsilon = 10\text{--}16$ эВ в эксперименте наблюдается группа быстрых электронов, количество которых на два порядка величины превышает концентрацию электронов в этой области энергий для максвелловской и рассчитанной функций. Столь существенное отличие вида экспериментально измеренной от рассчитанной функции связано с возрастанием электрического поля в области плазменного резонанса, возникающего в областях пространства, где концентрация электронов совпадает с критической величиной.

Поперечные распределения концентрации электронов на расстоянии $y = 1\text{--}60$ мм от поверхности антенны измерялись с помощью двойного зонда при различных давлениях воздуха $p = 0.1\text{--}20$ торр в конце импульса длительностью 100 мкс и подводимой импульсной мощности $W = 55$ кВт. У поверхности антенны ($y = 0.5$ мм) концентрация электронов в плазме поверхностного СВЧ-разряда в воздухе измерялась спектроскопическим методом по регистрации штарковского уширения спектральной линии H_β с длиной волны $\lambda = 486.1$ нм. В качестве малой примеси в камеру добавлялся водород в количестве, необходимом для возбуждения H_β линии. Полученные результаты приведены на рис. 9, 6. Видно, что в узком приповерхностном слое ($y = 0.5$ мм), где локализовано электрическое поле поверхностной волны, концентрация электронов равна $(6\text{--}9) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при изменении давления от 0.1 до 20 торр. Поперечные размеры плазменного ореола, существующего вокруг антенны, увеличиваются при уменьшении давления. Очевидно, что

в формировании поперечного к поверхности профиля плазмы большую роль играют амбиполярная диффузия заряженных частиц и электронная теплопроводность. Следует также отметить, что предварительные оценки показывают, что процессы фотовозбуждения, фотодиссоциации и фотоионизации молекул, входящих в состав воздуха, а также неконтролируемых в условиях эксперимента молекул примесей могут вносить определенный вклад в формирование полученного поперечного распределения концентрации электронов.

Так как поверхностный СВЧ-разряд существует при больших значениях приведенного электрического поля, то в плазме происходит эффективная диссоциация молекул кислорода и азота и сильное возбуждение атомарных и молекулярных частиц. В условиях эксперимента пространственно-временное распределение концентрации возбужденных атомов кислорода измерялось по интенсивности излучения неразрешенной триплетной линии кислорода ($\lambda = 777.1$ нм, 777.4 нм и 777.5 нм). Экспериментально показано, что поперечные размеры области локализации возбужденных атомарных частиц практически совпадают с областью локализации концентрации электронов, измеренной зондовым методом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены основные свойства поверхностного СВЧ-разряда в широком диапазоне давления воздуха от 10^{-3} до 10^3 торр. Можно выделить три характерных диапазона давлений, в каждом из которых внешний вид разряда и его основные свойства имеют свои особенности. Первый диапазон давлений — это низкие давления воздуха ($p < 10$ торр), когда частота столкновений ν_{en} электронов с молекулами много меньше круговой частоты ω электромагнитного поля. В этих условиях поверхностный СВЧ-разряд представляет собой однородное плазменное образование большого объема. Второй случай — это средние давления воздуха ($p = 10\text{--}40$ торр), когда $\nu_{en} \sim \omega$. Разряд представляет собой плазменный слой, покрывающий внешнюю поверхность антенны, при этом электрическое поле локализовано в приповерхностной области толщиной ~ 1 мм. Большое значение приведенного электрического поля $E/n = 100\text{--}500$ Тд ведет к эффективному вкладу энергии в плазму, быстрому нагреву газа и генерации ударных волн. Скорость распространения разряда вдоль антенны достигает величины 10^5 м/с. И, наконец, область высоких давлений воздуха ($p > 50$ торр) В этом случае частота столкновений электронов с молекулами много больше круговой частоты электромагнитного поля. При этом поверхностный разряд представляет собой сложную систему, состоящую из тонких ветвящихся плазменных каналов, диаметром от 0.1 мм до 1 мм в зависимости от давления газа, длительности воздействия и подводимой СВЧ-мощности. При высоких давлениях воздуха основным механизмом, определяющим распространение вдоль поверхности антенны СВЧ-разряда в стадии его формирования, является волна пробоя. При низких давлениях за механизм распространения поверхностного СВЧ-разряда в квазистационарной стадии

его развития ответственна амбиполярная диффузия. Механизм медленного горения возможен только на поздних стадиях существования разряда.

Показано, что основные параметры плазмы поверхностного СВЧ-разряд дают возможность применения его для разработки новых технологических источников плазмы и, в частности, в области сверхзвуковой плазменной аэродинамики.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-02-00336-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Орликовский А. А. // Микроэлектроника. 1999. **28**, № 6. С. 415.
- Moisan M., Zakrzewski Z. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. **24**, N 7. P. 1025.
- Daviaud S., Boisse-Laporte C., Leprince P., Marec J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1989. **22**. P. 770.
- Zakrzewski Z. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1983. **16**. P. 171.
- Двинин С. А., Постников С. А., Солнцев Г. С., Цветкова Л. И. // Физика плазмы. 1983. **9**, № 6. С. 1297.
- Кузьмин Г. П., Минаев И. М., Рухадзе А. А. // ТВТ. 2002. **40**, № 3. С. 515.
- Знаменская И. А., Луцкий А. Е., Мурсенкова И. В. // Письма в ЖТФ. 2004. **30**, № 24. С. 38.
- Знаменская И. А., Латфуллин Д. Ф., Луцкий А. Е. и др. // ЖТФ. 2007. **77**, № 5. С. 10.
- Минаев И. М., Рухадзе А. А., Черников В. А., Горячкин П. А. // Физика плазмы. 2018. **44**, № 6. С. 514.
- Лебедев Ю. А., Мокеев М. В. // ТВТ. 2000. **38**, № 3. С. 381.
- Грицинин С. И., Князев В. Ю., Косый И. А. и др. // Физика плазмы. 2004. **30**, № 3. С. 283.
- Александров К. В., Грачев Л. П., Есаков И. И., Ходатаев К. В. // ЖТФ. 2002. **72**, № 7. С. 58.
- Räuchle E. // J. de Physique IV. 1998. **8**. Pr7-99-Pr7-108.
- Gritsinin S. I., Kossyi I. A., Malykh N. I. Plasma coaxial discharge as a new type of the microwave surface wave discharge. — Preprint of RAS General Physics Institute. № 1. Moscow, Russia, 1999.
- Шибков В. М., Виноградов Д. А., Восканян А. В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2000. № 6. С. 65. (Shibkov V. M., Vinogradov D. A., Voskanyan A. V. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2000. **55**, N 6. P. 80.)
- Шибков В. М., Александров А. Ф., Ершов А. П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2004. № 5. С. 67. (Shibkov V. M., Aleksandrov A. F., Ershov A. P. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2004. **59**, N 5. P. 64.)
- Шибков В. М., Александров А. Ф., Ершов А. П. и др. // Физика плазмы. 2005. **31**, № 9. С. 857.
- Шибков В. М., Двинин С. А., Ершов А. П. и др. // Физика плазмы. 2007. **33**, № 1. С. 77.
- Shibkov V. M., Aleksandrov A. F., Chernikov V. A. et al. // Journal of Propulsion and Power. 2009. **25**, N 1. P. 123.
- Шибков В. М., Шибкова Л. В. // ЖТФ. 2010. **80**, № 1. С. 59.
- Шибков В. М., Шибкова Л. В., Громов В. Г. и др. // ТВТ. 2011. **49**, № 2. С. 163.
- Шибков В. М., Шибкова Л. В., Логунов А. А. // Физика плазмы. 2018. **44**, № 8. С. 661.
- Шибков В. М., Шибкова Л. В., Логунов А. А. // Физика плазмы. 2017. **43**, № 3. С. 314.
- Шибков В. М., Шибкова Л. В., Логунов А. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2018. № 5. С. 43. (Shibkov V. M., Shibkova L. V., Logunov A. A. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2018. **73**, N 5. P. 501.)
- Шибков В. М., Шибкова Л. В., Логунов А. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2017. № 3. С. 75. (Shibkov V. M., Shibkova L. V., Logunov A. A. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2017. **72**, N 3. P. 294.)
- Копыл П. В., Сурконт О. С., Шибков В. М., Шибкова Л. В. // Физика плазмы. 2012. **38**, № 6. С. 551.
- Шибков В. М., Ершов А. П., Черников В. А., Шибкова Л. В. // ЖТФ. 2005. **75**, № 4. С. 67.
- Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука. 1987.
- Шибкова Л. В., Шибков В. М. Разряд в смесях инертных газов. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005.
- Зарин А. С., Кузовников А. А., Шибков В. М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ. 1996.
- Шибков В. М., Двинин С. А., Ершов А. П., Шибкова Л. В. // ЖТФ. 2005. **75**, № 4. С. 74.
- Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974.
- Двинин С. А., Довженко В. А. // Физика плазмы. 1988. **14**, № 1. С. 66.
- Гильденбург В. Б., Гуцин И. С., Двинин С. А., Ким Ф. В. // ЖЭТФ. 1990. **96**, № 4. С. 1151.
- Двинин С. А., Шибков В. М., Михеев В. В. // Физика плазмы. 2006. **32**, № 7. С. 654.
- Mayhan J. T., Fante R. L., O'Keefe. // J. of Appl. Phys. 1971. **42**, N 13. P. 5362.
- Шибков В. М. // ТВТ. 1997. **35**, № 5. С. 693.
- Шибков В. М. // ТВТ. 1997. **35**, № 6. С. 871.
- Девятков А. М., Кузовников А. А., Лодинев В. В., Шибков В. М. // 1991. № 2. С. 29.
- Шибков В. М., Шибкова Л. В., Карачев А. А. // ТВТ. 2009. **47**, № 5. С. 650.
- Александров А. Ф., Шибков В. М., Шибкова Л. В. // ТВТ. 2010. **48**, № 5. С. 643.
- Шибков В. М., Шибкова Л. В. // ЖТФ. 2009. **79**, № 10. С. 65.
- Константиновский Р. С., Шибков В. М., Шибкова Л. В. // Кинетика и катализ. 2005. **46**, № 6. С. 821.
- Батанов Г. М., Грицинин С. И., Косый И. А. и др. // Труды ФИАН СССР. 1985. **60**. С. 174.
- Синкевич О. А., Соснин В. Е. // ЖЭТФ. 1996. **109**, № 4. С. 1.
- Гильденбург В. Б., Ким А. В. // ЖЭТФ. 1978. **74**, № 1. С. 141.
- Райзер Ю. П. // ЖЭТФ. 1965. **48**, № 5. С. 1508.
- Иванов Ю. А., Лебедев Ю. А., Полак Л. С. Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии. М.: Наука, 1981.
- Чен Ф. Электрические зонды. С. 94–164. В кн.: Диагностика плазмы / под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. М.: Мир, 1967.
- Алексеев Б. В., Котельников В. А. Зондовый метод диагностики плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1988.

Microwave Discharges and Their Application

I. Surface Microwave Discharge

V. M. Shibkov

Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University.

Moscow 119991, Russia.

E-mail: shibkov@phys.msu.ru.

The review presents the results of the fundamental research cycle, carried out at the Faculty of Physics of the Moscow State University, a new type of surface microwave discharge. The discharge was created by a surface wave on a dielectric antenna when a powerful electromagnetic radiation of a centimeter wavelength range was brought to it. The basic properties of the microwave discharge and the spatial and temporal evolution of the parameters of the plasma produced by a surface discharge are studied in a wide range of changes in the external conditions.

Keywords: surface microwave discharge, low-temperature plasma, electron concentration, electron temperature, gas heating, discharge propagation mechanisms, modeling, diagnostics.

PACS: 52.70.ds, 52.70.-m, 52.80.-s.

Received 25 April 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 5. Pp. 421–437.

Сведения об авторе

Шибков Валерий Михайлович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-13-37, (495) 939-25-47, e-mail: shibkov@phys.msu.ru.