

04;09;12

Сверхвысокочастотный разряд на поверхности диэлектрической антенны

© В.М. Шибков, А.П. Ершов, В.А. Черников, Л.В. Шибкова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия
e-mail: shibkov@ph-elec.phys.msu.ru

(Поступило в Редакцию 22 июня 2004 г.)

Исследован микроволновый разряд, создаваемый поверхностной волной на диэлектрическом теле, обтекаемом сверхзвуковым потоком воздуха. Показано, что разряд представляет собой тонкий плазменный слой, равномерно покрывающий внешнюю поверхность антенны. В условиях эксперимента скорость распространения разряда может достигать величины 100 km/s, что на несколько порядков величины превышает скорость звука в воздухе. Импульсная мощность, необходимая для создания поверхностного разряда в широком диапазоне давлений воздуха 10^{-3} – 10^3 Торг, не превышает величины 10^2 kW. Показано, что температура газа достигает 1000–2000 К, а на начальной стадии формирования поверхностного разряда наблюдается быстрый нагрев воздуха со скоростью ~ 50 K/ μ s. Данный тип разряда может найти практическое применение как в сверх- и гиперзвуковой плазменной аэродинамике (управление потоком вблизи поверхности тела, движущегося в плотных слоях атмосферы, снижение поверхностного трения, оптимизация условий воспламенения и горения сверхзвуковых потоков газообразного топлива и т. п.), так и для создания новых источников плазмы для целей микро- и наноэлектроники (плазменная обработка поверхности, травление, осаждение пленок и нанесение покрытий, для целей нанотехнологий).

Введение

Для развития современной авиации требуется осуществить поиск и разработку 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, уменьшать время воспламенения и управлять процессом горения сверхзвуковых потоков горючего в прямоточном двигателе. Одним из новых решений данных проблем является использование различного типа газовых разрядов. Поэтому в последнее время интенсивно развивается новое направление в физике плазмы, а именно сверхзвуковая плазменная аэродинамика [1,2]. 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 в гиперзвуковом прямоточном двигателе использовать неравновесную газоразрядную плазму. Однако, несмотря на то что разряд в потоке газа изучается в течение многих лет, физика разряда в сверхзвуковом потоке к настоящему времени находится в фазе становления. Имеется много нерешенных вопросов, среди которых доминирующими являются такие проблемы, как пробы газа, нахождение оптимальных режимов создания разряда в сверхзвуковом потоке воздуха, определение и исследование механизмов поддержания устойчивого плазменного образования в потоке газа, влияние потока на параметры плазмы газового разряда и влияние разряда на характеристики сверхзвукового потока. В настоящее время в различных лабораториях изучаются,

как правило, электродные разряды постоянного тока, а также импульсно-периодические и высокочастотные разряды в сверхзвуковом потоке воздуха. Такие разряды приводят к сильной эрозии электродов и поверхности модели и надежно не воспроизводятся в различных экспериментах. Возникла задача поиска оптимальных способов создания неравновесной плазмы в сверхзвуковом потоке газа. В нашей лаборатории для этой цели предложен новый тип сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда, а именно микроволновый разряд, который создается поверхностной волной на диэлектрическом теле, обтекаемом сверхзвуковым потоком воздуха [3].

Известно [4–9], что при создании СВЧ разряда внутри заполненной газом трубки с диэлектрическими стенками, подводимая к системе электромагнитная энергия трансформируется в поверхностную волну. При этом возникает самосогласованная система, когда для существования поверхностной волны необходима плазменная среда, создаваемая самой поверхностной волной. При этом волна распространяется в пространстве до тех пор, пока ее энергия достаточна для создания плазмы с концентрацией электронов не меньше, чем критическая концентрация $n_{ec} = m(\omega^2 + \nu^2)/(4\pi e^2)$, где e и m — заряд и масса электрона, ω — круговая частота поля, ν — частота столкновений электронов с нейтральными молекулами газа. За границу области пространства, где концентрация электронов уменьшается до значений n_{ec} , поверхностная волна не проникает и поверхностный разряд в этих местах не существует. Данный способ создания плазмы и устройство для ее создания называются сурфатроном. Этот способ достаточно подробно исследован и широко используется, например, в плазмохимии. В этом случае мы имеем систему

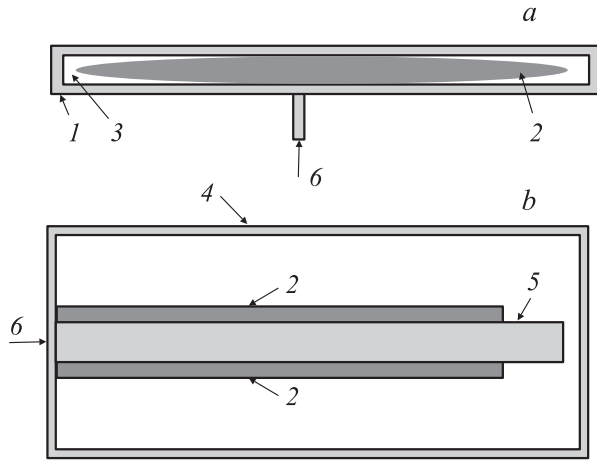


Рис. 1. Схемы создания поверхностного СВЧ разряда внутри диэлектрической трубки (*a*) и на внешней поверхности диэлектрической антенны (*b*): 1 — диэлектрическая трубка, 2 — плазма поверхностного СВЧ разряда, 3 — газ низкого давления, 4 — разрядная камера, 5 — диэлектрическая антенна, 6 — ввод СВЧ энергии.

плазма–диэлектрик–свободное пространство (рис. 1, *a*), 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 данной работе предлагается вывернуть рассмотренную выше систему наизнанку. В этом случае внутри располагается диэлектрик, на поверхности которого создается плазма, существование которой поддерживается поверхностной СВЧ волной (рис. 1, *b*).

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка включает в себя вакуумную камеру, магнетронный генератор, систему для ввода СВЧ энергии в камеру, систему для создания сверхзвукового потока и диагностическую систему. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

В качестве источника СВЧ излучения использовался импульсный магнетронный генератор сантиметрового диапазона длин волн [10]. Магнетронный генератор мог работать либо в однократном режиме, либо в режиме частых посылок СВЧ импульсов. Магнетрон имел следующие характеристики: длина волны $\lambda = 2.4$ см, отдаваемая в тракт импульсная СВЧ мощность $W < 300$ kW, длительность импульсов $\tau = 1–200$ μ s, частота повторения импульсов $f = 1–100$ Hz, скважность в режиме повторяющихся импульсов $Q = 1000$, при этом средняя мощность не превышала 300 W. Питание магнетрона осуществлялось специально разработанным в лаборатории импульсным модулятором с частичным разрядом накопительной емкости. Работа импульсного модулятора

основана на принципе относительно длительного накопления энергии в течение паузы между импульсами и кратковременной отдачи незначительной ее части генератору СВЧ во время импульса. СВЧ мощность подводилась к разрядной камере с помощью волноводного тракта прямоугольного сечения 9.5×19 мм, содержащего все необходимые для контроля и измерения элементы. Весь тракт был герметизирован, а для избежания электрического пробоя внутри волновода он наполнялся эле-газом при давлении 4 атмосферы. Введенный в разрядную камеру конец волновода через специально разработанное устройство соединялся с изготовленной из диэлектрических материалов (кварц или тефлон) антенной, на которой создавался поверхностный СВЧ разряд в сверхзвуковом потоке воздуха. Огибающая СВЧ импульса с выхода детектора регистрировалась на осциллографе. Форма огибающей была близка к прямоугольной. Этот же сигнал поступал на вход импульсного цифрового вольтметра, по показаниям которого определялась амплитуда микроволнового импульса, для чего предварительно производилась калибровка вольтметра с помощью calorиметрического измерителя мощности, который во время калибровки подключался к выходу основного плеча направленного ответвителя.

Разряд создавался в металлической цилиндрической барокамере. Внутренний диаметр вакуумной камеры равен 1 м, длина равна 3 м. Вакуумная система позволяла производить интересующие нас исследования в широком диапазоне давлений от 10^{-3} до 10^3 Торр. Вакуумная камера состояла из двух секций: большой и малой. Большая секция камеры, смонтированная на тележке, могла с помощью специального запорного устройства отсоединяться от малой секции и откатываться по рельсам, что обеспечивало легкий доступ внутрь камеры для размещения

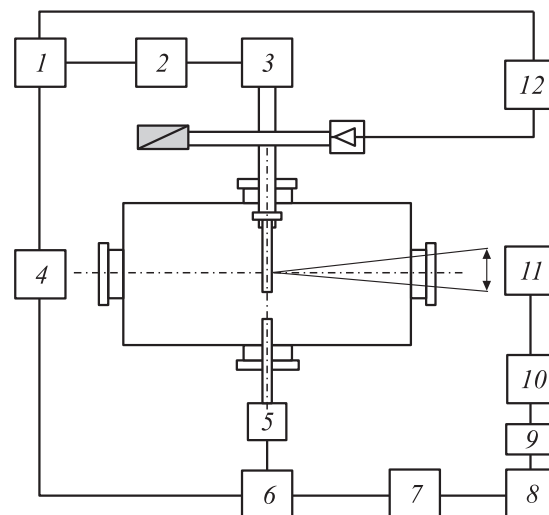


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1, 6 — блоки синхронизации; 2 — модулятор; 3 — магнетрон; 4 — задающий генератор; 5 — система для создания сверхзвукового потока воздуха; 7 — компьютер; 8 — блок питания; 9 — ПЗС линейка; 10 — фотоэлектронный умножитель; 11 — монохроматор; 12 — цифровой осциллограф.

в ней необходимых экспериментальных объектов и для других технологических целей. По боковой поверхности камеры расположено несколько диагностических окон различного диаметра $d = 10\text{--}50\text{ см}$ и ряд герметических электрических разъемов, что позволяло проводить наблюдения за процессами внутри камеры и обеспечивало подачу необходимых электрических напряжений и других управляющих и вспомогательных сигналов внутрь камеры без нарушения ее герметичности.

В установке для создания воздушного сверхзвукового потока с заданным числом Маха использовался электро-механический клапан, на выходной трубке которого размещалось профилированное сопло Леваля. Чтобы сопло не влияло на распространение СВЧ энергии, оно было сделано из диэлектрического материала. В данных экспериментах измерения проводились с использованием цилиндрического или прямоугольного сопел, рассчитанных для чисел Маха потока $M = 2$. Электро-механический клапан устанавливался на фланце бокового иллюминатора камеры так, чтобы воздушный сверхзвуковой поток был направлен вдоль горизонтального диаметра камеры. Для синхронизации работы электро-механического затвора и СВЧ разряда использовалась специальная схема, обеспечивающая временную задержку между включением разряда и открытием клапана. В условиях экспериментов электро-механический клапан открывался на 2 с. В течение этого же времени создавался поверхностный СВЧ разряд. Направление сверхзвукового потока противоположно направлению распространения поверхностной СВЧ волны, т.е. направлению распространения поверхностного разряда.

Методы диагностики

Для измерения пороговых характеристик поверхностного СВЧ разряда в эксперименте регистрировались 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 увеличивалась и фиксировался тот уровень мощности, при котором на поверхности диэлектрического тела начинала образовываться плазма. Такие измерения проводились несколько раз, после чего проводилось усреднение полученных данных. После этого давление в барокамере при фиксированной длительности импульса изменялось и регистрировалось значение пороговой мощности при новом давлении. В экспериментах момент образования разряда фиксировался 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 подавался сигнал с СВЧ детектора. Амплитуда этого сигнала была пропорциональна подводимой импульсной СВЧ мощности.

Общий вид поверхностного СВЧ разряда фиксировался на фотопленку в двух проекциях (вид сбоку и вид сверху). Фотометрирование пленки на микрофотометре позволяло определить продольный размер поверхностного разряда при различных давлениях воздуха, длительностях и мощностях СВЧ импульсов. Общий вид поверхностного СВЧ разряда регистрировался также с использованием цифровой видеокамеры. При последующем воспроизведении можно было измерить размеры разряда при различных длительностях СВЧ импульса и определить продольную скорость его распространения.

Температура газа определялась спектроскопическим методом, основанным на регистрации распределения интенсивностей линий вращательной структуры полосы (0; 2) с длиной волны канта $\lambda = 380.5\text{ нм}$ второй положительной системы азота. Колебательная температура определялась по относительным интенсивностям полос второй положительной системы молекулярного азота и молекулярных полос циана. Для измерения газовой и колебательной температур проводилась регистрация спектра излучения плазмы поверхностного СВЧ разряда с использованием спектрографа СТЭ-1 (с переменной обратной линейной дисперсией $0.3\text{--}1.0\text{ нм/мм}$) и монохроматоров ДФС-12 и МДР-23 (обратные линейные дисперсии 0.5 и 1.3 нм/мм соответственно). Излучение плазмы из определенного поперечного сечения разряда при помощи системы линз и зеркал проецировалось на входные щели спектральных приборов. Фокусные расстояния линз были подобраны таким образом, чтобы получить на входной щели уменьшенное изображение разряда. В качестве приемного устройства излучения за выходной щелью монохроматора размещались либо фотоэлектронный умножитель, либо ПЗС линейка — диодный блок, состоящий из большого числа светочувствительных элементов, расположенных на одной линии. Пространственное разрешение системы регистрации определялось числом светочувствительных элементов и их размерами. В используемой системе число элементов было 3650, а размер каждого элемента был $8 \times 8\text{ мкм}$, что позволяло для данной оптической системы получить пространственное разрешение не хуже 0.4 мм . Видеоцифровые сигналы с приемного устройства, прямо пропорциональные интенсивности излучения в спектральной области длин волн $\lambda = 300\text{--}900\text{ нм}$, кодировались программно-считывающим согласующим устройством, которое представляло собой аналого-цифровой преобразователь, расположенный на интерфейсной карте, и затем подавались на вход персонального компьютера, в памяти которого формировался массив данных. Спектр разряда мог быть выведен либо на монитор компьютера, либо на принтер для печати, для чего использовались специальные программные коды.

Экспериментальные результаты

В работе предложен новый способ создания разряда на поверхностной СВЧ волне для оптимального внешнего воздействия на пограничный слой, существующий

вблизи тела, обтекаемого сверхзвуковым потоком воздуха. С этой целью была разработана и изготовлена антенна специальной конструкции из диэлектрического материала. В экспериментах поверхностный СВЧ разряд создавался на антенне прямоугольного сечения $9.5 \times 19 \text{ mm}$ длиной $l = 15 \text{ cm}$. Антенна служила также в качестве вакуумно-уплотняющего элемента. Она отделяла объем волновода, наполненного SF_6 при давлении 4 атмосферы, от объема барокамеры, в которой давление воздуха в процессе проведения экспериментов изменялось от 10^{-3} до 10^3 Torr .

Вначале были изучены условия возникновения поверхностного СВЧ разряда и степень влияния сверхзвукового потока на общий вид разряда. На рис. 3 приведена зависимость от давления воздуха минимальной мощности СВЧ излучения, необходимой для пробоя и начала образования поверхностного разряда на диэлектрическом теле при длительности импульсов $\tau = 1.5 \mu\text{s}$ и частоте их следования $f = 40 \text{ Hz}$. Видно, что мощность используемого генератора достаточна для создания поверхностного СВЧ разряда в широком диапазоне изменения давления воздуха от 10^{-3} до 10^3 Torr . 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 неупругих потерь электронов с увеличением давления. Известно, что в воздухе при давлении $p < 1 \text{ Torr}$ основным каналом гибели электронов при пробое разрядного промежутка является диффузия, а при $p \geq 1-10 \text{ Torr}$ — прилипание. Для компенсации потерь электронов требуется большая частота ионизации. Частота ионизации является растущей функцией температуры электронов $\nu_i = f(T_e)$, т.е. приведенного электрического поля E/n (E — напряженность электрического поля, n — концентрация молекул) или

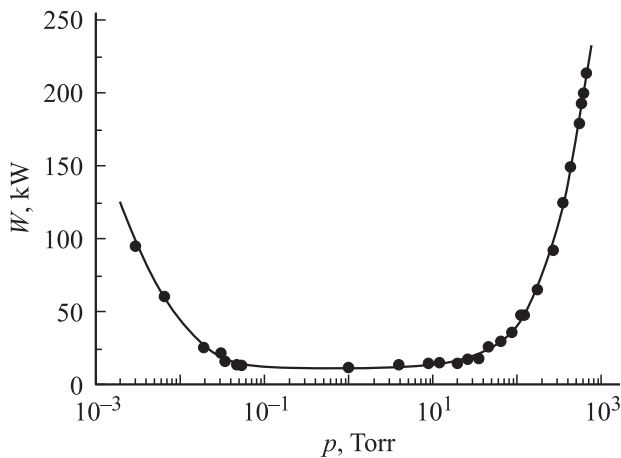


Рис. 3. Зависимость от давления воздуха минимальной импульсной мощности, необходимой для создания поверхностного СВЧ разряда при длительности импульса $\tau = 1.5 \mu\text{s}$ и частоте следования $f = 40 \text{ Hz}$.

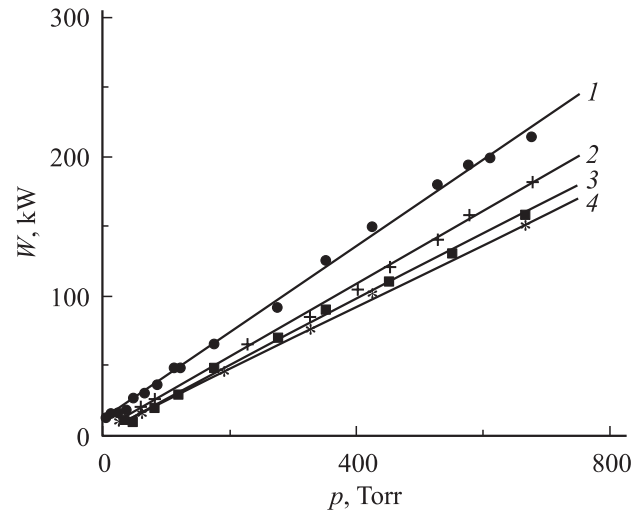


Рис. 4. Пороговые характеристики поверхностного СВЧ разряда, создаваемого при различных длительностях СВЧ импульса $\tau, \mu\text{s}$: 1 — 1.5, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 50–100.

СВЧ мощности W . Для воздуха частота диффузионных потерь $\nu_D = 10^5/(\Lambda^2 p) [\text{s}^{-1}]$ (Λ — характерный размер плазмы) обратно пропорциональна давлению, а частота прилипания электронов $\nu_a = 6 \cdot 10^4 p [\text{s}^{-1}]$ растет с ростом давления. Отсюда для создания поверхностного СВЧ разряда при малых ($p < 10^{-1} \text{ Torr}$) и больших ($p > 10^1 \text{ Torr}$) давлениях воздуха требуется подводить к антенне большую мощность, что и наблюдается в эксперименте (рис. 3).

На рис. 4 представлены данные по пороговым характеристикам поверхностного разряда, создаваемого при различных длительностях СВЧ импульса. Видно, что при фиксированном давлении воздуха с ростом длительности импульса от 1.5 до $10 \mu\text{s}$ мощность, необходимая для образования поверхностного разряда, резко уменьшается, тогда как для $\tau > 50 \mu\text{s}$ порог пробоя почти не зависит от длительности воздействия.

Допустим, что внешнее поле включается быстро по сравнению с характерным временем возникновения заряженных частиц и остается постоянным в течение времени развития лавины. В этом предположении можно считать, что после включения поля в момент времени $t = 0$ 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:

$$\nu_i = \frac{1}{\tau} \ln \frac{n_e}{n_{e0}} + \nu_a + \nu_D, \quad (1)$$

где первый член в правой части уравнения определяет влияние конечной длительности импульса на пробойные характеристики, n_e — концентрация электронов, n_{e0} — число затравочных электронов.

В случае низких давлений газа $p < 1 \text{ Torr}$ коэффициент диффузии $D \sim 1/p$ велик и диффузионные потери

электронов значительны $v_D > v_a$. Для их компенсации требуется большая скорость ионизации, т.е. сильное поле. При этом пороговое поле пропорционально частоте СВЧ излучения и обратно пропорционально плотности (давлению) газа и размерам разрядного объема [11].

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. Оценим частоту ионизации для условий эксперимента: $p > 10 \text{ Torr}$, $\tau = 50 \mu\text{s}$, $n_{e0} = 10^2 \text{ cm}^{-3}$, $n_e = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. В этом случае частота прилипания больше частоты диффузии, первое слагаемое в правой части выражения (1) приблизительно равной $4 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$, а второе — $6 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$, т.е. их сумма равна 10^6 s^{-1} . Отсюда мы видим, что частота ионизации при $p = 10 \text{ Torr}$ должна быть не меньше 10^6 s^{-1} , а при $p = 760 \text{ Torr}$ — больше $\sim 5 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$. При этом при расчете порога пробоя при $\tau \leq 50 \mu\text{s}$ необходимо учитывать длительность СВЧ импульса, что хорошо согласуется с экспериментальными данными (рис. 4).

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 [10]. 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 $n < n_0$ (где n_0 — 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. В нашем случае размер $l = 15 \text{ cm}$, а для $M = 2$ скорость невозмущенного потока $v_f = 550 \text{ m/s}$, тогда $t \sim 300 \mu\text{s}$. Период следования импульсов в эксперименте $T = 25\text{--}50 \text{ ms}$, 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.

Общий вид поверхностного СВЧ разряда на затупленной диэлектрической антенне, обтекаемой сверхзвуковым потоком воздуха при числах Маха $M = 2$, приведен на рис. 5. Видно, что разряд представляет собой однородно светящуюся плазму, покрывающую при данных условиях всю поверхность диэлектрического тела, и сверхзвуковой поток воздуха не разрушает исследуемый разряд.

Экспериментальные исследования временной зависимости продольных размеров поверхностного СВЧ разряда были проведены при изменении давления воздуха в барокамере в диапазоне $p = 1\text{--}100 \text{ Torr}$ и подводимой импульсной СВЧ мощности $W = 10\text{--}300 \text{ kW}$. Для примера на рис. 6 представлены в полулогарифмическом масштабе зависимости от длительности СВЧ импульса продольных размеров поверхностного разряда при $p = 10 \text{ Torr}$. Параметром этого семейства прямых является подводимая к антенне импульсная СВЧ мощность. Видно, что при фиксированной длительности воздействия продольный размер поверхностного разряда растет с увеличением подводимой мощности. При этом на стадии возникновения СВЧ разряда скорость его распространения может достигать величины 10^7 cm/s , что на несколько порядков величины превышает скорость звука в воздухе. Аналогичные результаты были получены и при других давлениях.

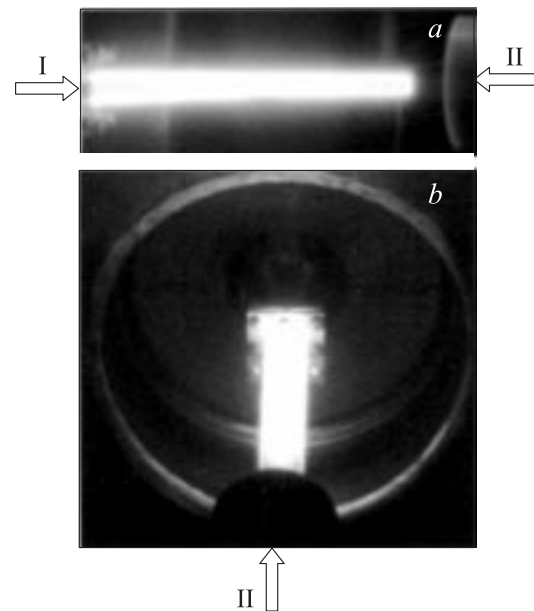


Рис. 5. Общий вид поверхностного СВЧ разряда на диэлектрической антенне прямоугольной конфигурации при $M = 2$, $p = 40 \text{ Torr}$, $\tau = 50 \mu\text{s}$ и $f = 40 \text{ Hz}$ (*a* — вид сбоку, *b* — вид сверху под углом 45° к вертикали). Стрелками показаны направления распространения микроволновой энергии (I) и сверхзвукового потока воздуха (II).

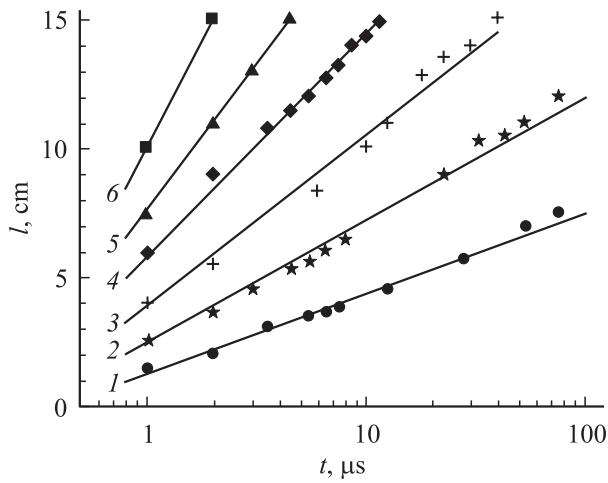


Рис. 6. Зависимости продольных размеров поверхностного разряда от длительности СВЧ импульса при $p = 10$ Torr, $f = 20$ Hz и подводимой СВЧ мощности W , kW: 1 — 25, 2 — 35, 3 — 55, 4 — 75, 5 — 100, 6 — 175.

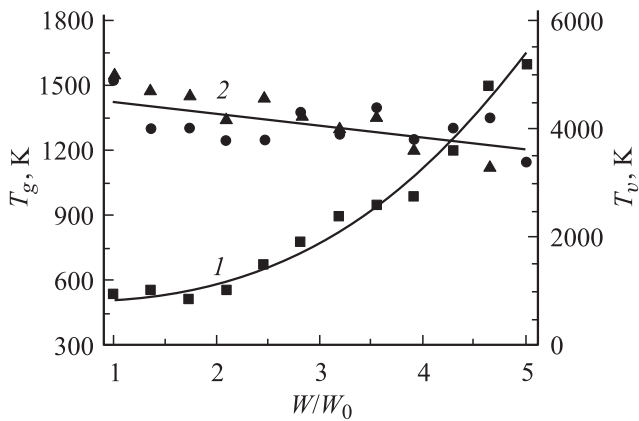


Рис. 7. Зависимости от мощности газовой (1) и колебательной (2) температур при $p = 40$ Torr, $\tau = 50 \mu\text{s}$, $f = 40$ Hz, $z = 2.5$ cm. Колебательная температура измерялась по молекулярным полосам второй положительной системы азота (кружки) и по молекулярным полосам циана (треугольники).

В различных сечениях поверхностного разряда были измерены зависимости газовой и колебательной температур от подводимой к антенне импульсной микроволновой мощности. На рис. 7 представлены зависимости от мощности газовой и колебательной температур в плазме поверхностного СВЧ разряда. Из приведенных результатов видно, что в этих условиях с ростом надпороговости $\chi = W/W_0$ (W — подводимая к антенне импульсная СВЧ мощность; W_0 — пороговая мощность, необходимая для пробоя и возникновения поверхностного разряда в данных условиях) температура газа в сечении разряда с продольной координатой $z = 2.5$ cm увеличивается от ~ 500 K при $\chi = 1$ до ~ 1600 K при $\chi = 5$, 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 к концу антенны.

Результаты измерений временного хода температуры газа в сечении разряда с координатой $z = 2.5$ cm приведены на рис. 8. Видно, что на начальной стадии существования поверхностного СВЧ разряда наблюдается быстрый нагрев газа со скоростью нагрева $dT_g/dt \sim 50$ K/ μs . На этом же рисунке штриховой кривой приведены результаты математического моделирования нагрева газа. В расчетах использовалась нестационарная кинетическая модель, разработанная в работах [10,12–14] 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 температур 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 ответственен механизм, связанный с эффективным возбуждением при больших значениях приведенного электрического поля $E/n \geq 10^{-15}$ V·cm² электронно-возбужденных состояний молекул азота с последующим

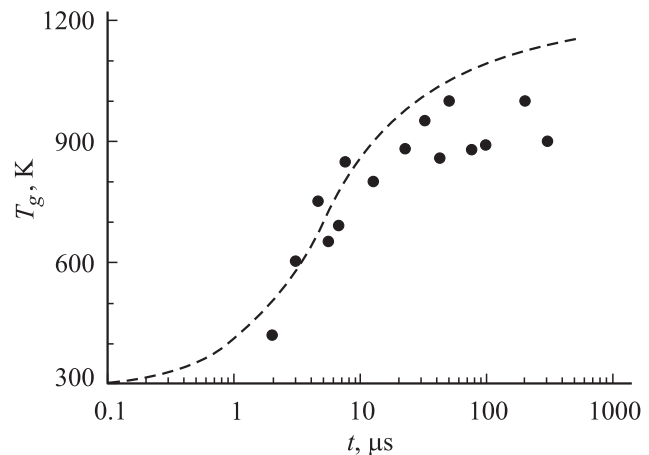


Рис. 8. Временной ход температуры газа в плазме поверхностного СВЧ разряда в сечении с координатой $z = 2.5$ cm (кружки — эксперимент при $p = 10$ Torr, $W = 80$ kW; штриховая кривая — расчет для $E/n = 1.5 \cdot 10^{-15}$ V·cm²).

их тушением. При этом часть энергии возбуждения этих состояний передается в тепло, что и обеспечивает наблюдаемый в эксперименте быстрый нагрев газа.

Заключение

В работе предложен и экспериментально реализован новый способ создания разряда в потоке газа. Рассмотренный вид поверхностного СВЧ разряда является надежным и практически легко осуществимым способом создания низкотемпературной плазмы в сверхзвуковом потоке воздуха. Микроволновая энергия сосредоточена в тонком приповерхностном слое, что приводит к эффективному вкладу энергии в газ. Результаты математического моделирования показывают, что основным механизмом, ответственным за наблюдаемый в условиях эксперимента быстрый нагрев воздуха, является тушение электронно-возбужденных состояний молекул азота, эффективно возбуждаемых при больших значениях приведенного электрического поля. Скорость распространения поверхностного СВЧ разряда, достигающая 10–100 km/s, намного превышает скорость звука в воздухе, что указывает на перспективность его использования в разрабатываемых гиперзвуковых летальных аппаратах, которые будут летать с гиперзвуковыми скоростями при $M = 10–20$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02-02-17116) и Европейского управления аэрокосмических исследований и разработок (EOARD) (проект № 2248р Международного научно-технического центра).

Список литературы

- [1] International Space Planes and Hypersonic System and Technologies Conf. Workshop on Weakly Ionized Gases. Proc. AIAA. Colorado, 1997; Norfolk, 1998, 1999; Anaheim, 2001; Reno, 2002, 2003, 2004.
- [2] The International Workshops on Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications. Proc. Moscow: IVTAN, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003.
- [3] Шибков В.М., Виноградов Д.А., Восканян А.В. и др. // Вестник Московского ун-та. Сер. 3. Физика, астрономия. 2000. Т. 41. № 6. С. 64–66.
- [4] Moisan M., Ferreira C.M., Hajlaoui Y. et al. // Rev. Phys. Appl. 1982. Vol. 17. P. 707–727.
- [5] Двинин С.А., Довженко В.А., Солнцев Г.С. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 6. С. 1228–1235.
- [6] Daviaud S., Boisse-Laporte C., Leprince P. et al. // J. Phys. D. 1989. Vol. 22. P. 770–779.
- [7] Granier A., Boisse-Laporte C., Leprince P. et al. // Phys. Appl. 1989. Vol. 20. P. 204–209.
- [8] Marec J., Leprince P. // J. de Physique IV. France, 1998. Vol. 8. P. 7-21–7-32.
- [9] Moisan M., Ferreira C.M. // Phys. Scripta. 1998. Vol. 38. P. 382–399.
- [10] Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ разряд в воздухе. Нефть и газ. М., 1996. 204 с.

- [11] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.
- [12] Девятков А.М., Кузовников А.А., Лодинев В.В., Шибков В.М. // Вестник Московского ун-та. Сер. 3. Физика, астрономия. 1991. Т. 32. № 2. С. 29–33.
- [13] Шибков В.М. // ТВТ. 1997. Т. 35. № 5. С. 693–701.
- [14] Шибков В.М. // ТВТ. 1997. Т. 35. № 6. С. 871–875.