

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

РАДИОФИЗИКА

УДК 533.9

ПОВЕРХНОСТНЫЙ СВЧ-РАЗРЯД В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

В. М. Шибков, Д. А. Виноградов, А. В. Восканян, А. П. Ершов,
И. Б. Тимофеев, Л. В. Шибкова, В. А. Черников

(кафедра физической электроники)

Предложен новый способ получения устойчивого, постоянно воспроизводимого в различных экспериментах поверхностного СВЧ-разряда в пограничном слое у диэлектрического тела, обтекаемого сверхзвуковым потоком воздуха. Определены основные параметры плазмы такого разряда.

В последнее время начинает развиваться новое направление аэродинамики — плазменная сверхзвуковая аэродинамика [1–3], которая изучает воздействие газовых разрядов различного типа на характеристики потока газа вблизи поверхности летательного аппарата. Однако электродные разряды в потоке неустойчивы, пространственно неоднородны, кроме того, они приводят к сильной эрозии поверхности обтекаемого тела. Поэтому возникла задача создания плазмы в сверхзвуковом потоке оптимальным способом. В настоящей работе предложен один из таких способов — возбуждение новой разновидности поверхностного разряда, а именно СВЧ-разряда на внешней поверхности диэлектрического тела, обтекаемого сверхзвуковым потоком воздуха. Известно [4, 5], что при создании СВЧ-разряда внутри заполненной газом диэлектрической трубки подводимая к системе электромагнитная энергия трансформируется в поверхностную волну. При этом образуется самосогласованная система: для существования поверхностной волны необходима плазменная среда, создаваемая самой поверхностной волной. Волна существует, пока ее энергия достаточна для создания плазмы с концентрацией электронов не меньше критической. В этом случае имеет место система плазма–диэлектрик–свободное пространство, т. е. внутри разрядной трубки, заполненной газом при пониженном давлении, возникает создаваемая поверхностной волной плазма. Мы предлагаем как бы вывернуть эту систему наизнанку: на поверхности диэлектрика, помещенного в газовую среду, создать плазму, существование которой поддерживается поверхностной СВЧ-волной. Аналогичные эксперименты проведены в работах [6, 7]. 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 между внешним и внутренним коаксиальными металлическими электродами. Линейный поверхностный разряд возбуждался на внешней поверхности трубки.

В настоящей работе поверхностный разряд создавался на экспериментальном стенде [8], в качестве источника СВЧ-энергии использовался импульсный магнетронный генератор, рабочие характеристики которого следующие: длина волны $\lambda = 2,4$ см; отдаваемая в тракт импульсная мощность $W < 600$ кВт; длительность импульсов $\tau = 1 \div 300$ мкс, частота их следования $f = 1 \div 100$ Гц; скважность в режиме повторяющихся импульсов $Q = 1000$. СВЧ-энергия поступала в разрядную камеру по волноводному тракту прямоугольного сечения $9,5 \times 19$ мм. Для предотвращения электрического пробоя волноводная система наполнялась газом SF_6 при давлениях до 5 атм. Введенный в разрядную камеру конец волновода через специально разработанное устройство соединялся с изоготовленным из диэлектрического материала (тефлон) телом. В первых экспериментах поверхностный СВЧ-разряд создавался на диэлектрическом теле длиной $L = 15$ см с прямоугольным сечением 1×2 см.

Общий вид СВЧ-разряда на внешней поверхности тела, помещенного в сверхзвуковой поток воздуха, приведен на рис. 1. Направление сверхзвукового потока в экспериментах было противополо-

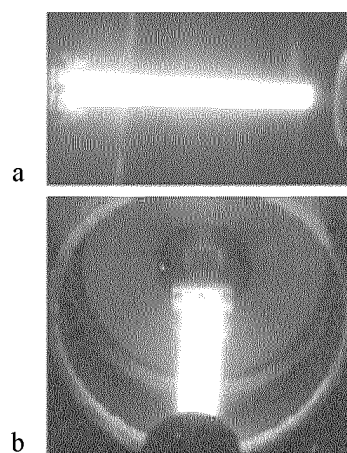


Рис. 1. Общий вид поверхностного СВЧ-разряда на диэлектрическом теле прямоугольной конфигурации при $M = 2$, $p = 40$ Торр, $\tau = 50$ мкс и $f = 100$ Гц (*a* — вид сбоку, *b* — вид сверху под углом 45° к вертикали)

ложным направлением распространения поверхностной СВЧ-волны. Разряд представляет собой тонкий (~ 1 мм) однородно светящийся слой плазмы, покрывающей при данных условиях всю поверхность диэлектрического тела. При этом сверхзвуковой поток воздуха с числом Маха $M = 2$ не оказывает заметного влияния на общий вид поверхностного СВЧ-разряда на диэлектрическом теле и необходимую для его поддержания СВЧ-мощность. Эксперименты, проведенные при давлении $p = 1 \div 100$ Тор и мощности $W = 10 \div 300$ кВт, показали, что при фиксированной длительности воздействия по мере увеличения подводимой мощности продольный размер поверхностного разряда и скорость его распространения увеличиваются. При этом на начальных стадиях существования поверхностного разряда эта скорость велика: $v = 10^7$ см/с при $W = 200$ кВт, а на поздних стадиях уменьшается: $v = 10^4$ см/с при $W = 25$ кВт. При давлении воздуха $p = 40$ Тор и длительности импульса $\tau = 50$ мкс с ростом мощности температура газа T_g в разряде увеличивается от ~ 500 К при $W = 35$ кВт до ~ 1700 К при $W = 175$ кВт, тогда как колебательная температура при этих условиях практически неизменна — незначительно уменьшается с увеличением мощности. При исследовании распределения T_g вдоль диэлектрического тела было обнаружено, что температура газа имеет максимальное значение в месте возбуждения поверхностного СВЧ-разряда и уменьшается с приближением к концу тела.

При возникновении разряда вначале наблюдается быстрый нагрев газа со скоростью нагрева $dT_g/dt \geq 50$ К/мкс. Аналогичный результат был получен нами в работах [8, 9] при исследовании кинетики нагрева газа в условиях свободно локализованного разряда в сфокусированном СВЧ-пучке. В этих же работах было показано, что при больших значениях приведенной напряженности электрического поля ($E/n \geq 10^{-15}$ В·см²) быстрый нагрев газа объясняется эффективным возбуждением электронных состояний молекул азота с последующим их тушением.

Как показывают оценки, только тушение долгоживущих электронных состояний молекулы азота, которые эффективно возбуждаются в условиях поверхностного СВЧ-разряда в воздухе, обеспечивает зарегистрированную нами в данной работе скорость нагрева.

Были проведены также эксперименты по созданию поверхностного СВЧ-разряда на плоской пластине. Для этого использовалась пластина из тефлона с размерами $1 \times 14 \times 20$ см. В месте возникновения плазмы происходит трансформация подводимой СВЧ-энергии в поверхностную волну, которая распространяется во всех направлениях, создавая на поверхности диэлектрика тонкий слой однородно светящейся плазмы толщиной ~ 1 мм. С увеличением мощности все большая часть поверхности пластины покрывается плазмой (рис. 2). Скорость распространения поверхностного разряда на пластине, как и скорость распространения разряда на антенне, зависит от длительности и мощности СВЧ-импульса.

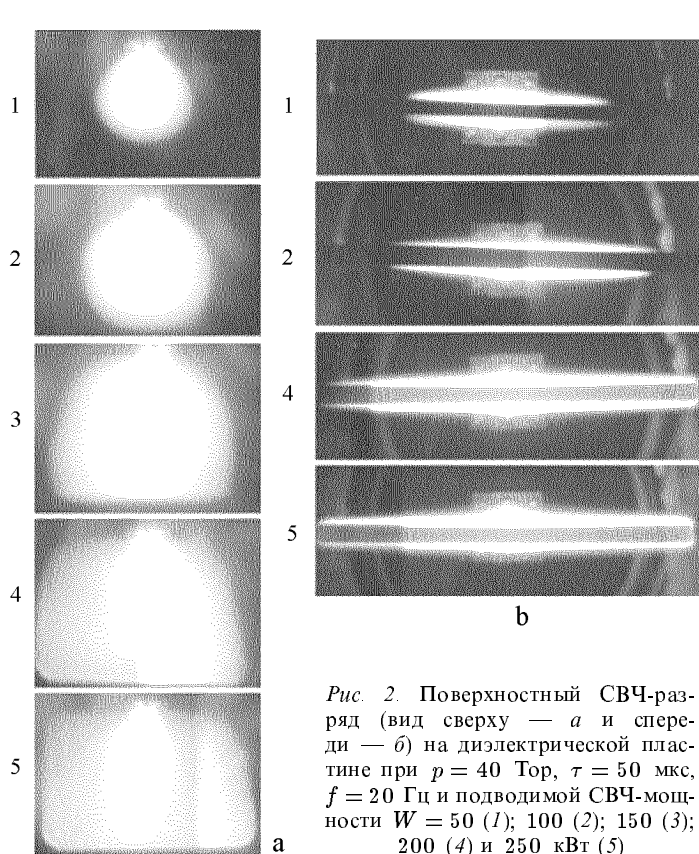


Рис. 2. Поверхностный СВЧ-разряд (вид сверху — а и спереди — б) на диэлектрической пластине при $p = 40$ Тор, $\tau = 50$ мкс, $f = 20$ Гц и подводимой СВЧ-мощности $W = 50$ (1); 100 (2); 150 (3); 200 (4) и 250 кВт (5)

Авторы приносят благодарность профессору А.Ф. Александрову за полезные обсуждения на стадии постановки задачи.

Литература

1. Intern. Space Planes and Hypersonic System and Technol. Conf.. Proc. of Workshop on Weakly Ionized Gases. Colorado, USA (AIAA-1997); Norfolk, USA (AIAA-1998); Norfolk, USA (AIAA-1999).
2. Proc. of the First and Second Workshops on Magneto- and Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications. Moscow, Russia (IVTAN-1999); Moscow, Russia (IVTAN-2000).
3. Александров А.Ф., Тимофеев И.Б., Чувашев С.Н. // Прикл. физика. 1996. № 3. С. 112.
4. Moisan M., Zakrzewski Z. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. 24. P. 1025.
5. Двинин С.А., Постников С.А., Солнцев Г.С., Цветкова Л.И. // Физика плазмы. 1983. 9, № 6. С. 1297.
6. R uchle E. // J. de Physique IV. 1998. 8. Pr7. P. 99.
7. Gritsinin S.I., Kossyi I.A., Malykh N.I. et al. Prepr. of Russian Acad. of Sci. General Physics Institute. Moscow, 1999, № 1.
8. Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996.
9. Шибков В.М. // Теплофиз. высоких температур. 1997. 35. № 5. С. 693; № 6. С. 871.

Поступила в редакцию
12.05.00