

УДК 533.9

## ПОВЕРХНОСТНЫЙ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ ВОЗДУХА

Л. В. Шибкова

(кафедра физической электроники)

E-mail: shibkov@phys.msu.ru

**Исследован поверхностный СВЧ-разряд на кварцевой антенне при высоких давлениях воздуха. Показано, что формирование разряда сопровождается генерацией ударных волн, а продольная скорость его распространения достигает нескольких километров в секунду, что делает перспективным применение этой формы разряда в сверхзвуковой аэродинамике.**

Для поиска оптимальных способов создания неравновесной плазмы в сверхзвуковом потоке газа в [1] был предложен новый тип сверхвысокочастотного разряда, а именно микроволновый разряд, который создается поверхностной волной на диэлектрическом теле, обтекаемом сверхзвуковым потоком воздуха. Известно, что при создании СВЧ-разряда внутри заполненной газом трубки с диэлектрическими стенками подводимая к системе электромагнитная энергия трансформируется в поверхностную волну. В этом случае 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  $n_{ec}$ . За границу области пространства, где концентрация электронов уменьшается до значения  $n_{ec}$ , поверхностная волна не проникает и поверхностный разряд в этих местах не существует. Этот способ достаточно подробно исследован и широко используется, например, в плазмохимии. В этом случае имеется система 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 окружающий разрядную трубку атмосферный воздух. В [1–7] исследуется система диэлектрик – плазма – свободное пространство, когда внутри располагается диэлектрик, на поверхности которого создается плазма, существование которой поддерживается поверхностной СВЧ-волной.

В [7] было показано, что при низких давлениях воздуха  $p < 1$  Тор, когда частота столкновений электронов с нейтральными молекулами много меньше круговой частоты электромагнитной энергии, поверхностный СВЧ-разряд представляет собой однородное большого объема плазменное образование,

размеры которого растут с уменьшением давления. Степень ионизации при  $p = 10^{-3}$  Тор достигает 10% и более. Такой разряд перспективен для разработки новых источников плазмы для целей микро- и наноэлектроники (плазменная обработка поверхности, травление, осаждение пленок и нанесение покрытий, для целей нанотехнологий).

При средних давлениях воздуха  $1 \text{ Тор} < p < 50 \text{ Тор}$ , когда частота столкновений электронов с нейтральными молекулами порядка круговой частоты электромагнитной энергии, поверхностный СВЧ-разряд в воздухе представляет собой плазменное образование толщиной  $\leq 1$  мм, равномерно покрывающее поверхность антенны [3, 4]. В начальные моменты времени скорость распространения поверхностного СВЧ-разряда в зоне его формирования достигает значения  $10^7$  см/с. Так как напряженность электрического поля в условиях поверхностного СВЧ разряда велика и поле локализовано в тонком приповерхностном слое, то в этих условиях происходят эффективные диссоциация и нагрев молекулярного газа. Эти факты очень важны с точки зрения уменьшения поверхностного трения при использовании поверхностного СВЧ-разряда для ввода энергии в пограничный слой и для инициации воспламенения сверхзвуковых потоков углеводородного топлива.

В настоящей работе исследован микроволновый разряд, создаваемый поверхностной волной на диэлектрическом теле, при высоких, вплоть до атмосферного, давлениях воздуха. Экспериментальная установка включает в себя вакуумную камеру, магнетронный генератор, систему для ввода СВЧ-энергии в камеру и диагностическую систему. В качестве источника излучения использовался импульсный магнетронный генератор, работающий 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  $W < 100$  кВт; длительность

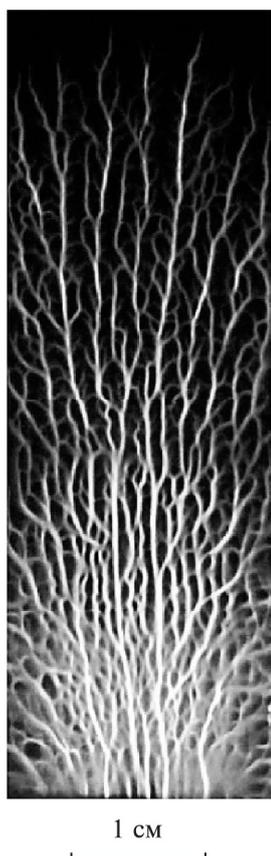


Рис. 1. Общий вид (вид спереди) поверхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении воздуха. Длительность импульса  $\tau = 10$  мкс, импульсная мощность  $W = 55$  кВт, СВЧ-энергия распространяется снизу вверх

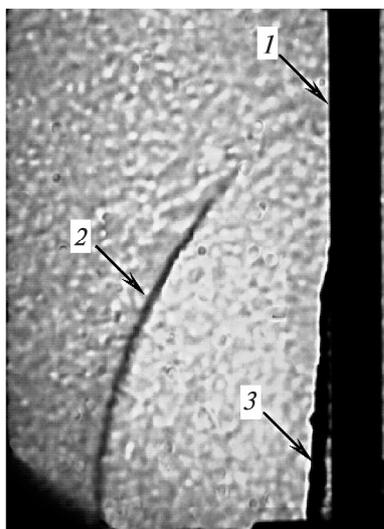


Рис. 2. Мгновенная (время экспозиции 4 мкс) теневая фотография (вид сбоку) области существования поверхностного СВЧ-разряда при давлении воздуха 1 атм, импульсной СВЧ-мощности 55 кВт, длительности импульса 100 мкс. Время задержки момента съемки относительно переднего фронта СВЧ-импульса 120 мкс

импульсов  $\tau = 1-100$  мкс; частота повторения импульсов  $f = 1-100$  Гц, скважность в режиме повторяющихся импульсов  $Q = 1000$ ; при этом средняя мощность не превышала 100 Вт. Экспериментальные исследования проводились в диапазоне давлений воздуха от 1 до 760 Тор.

На рис. 1. представлен общий вид поверхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении воздуха. Разряд при высоких давлениях представляет собой сложную систему, состоящую из тонких ветвящихся плазменных каналов диаметром от 0.1 до 1 мм в зависимости от длительности воздействия, давления газа и подводимой СВЧ-мощности. СВЧ-разряд, близкий по структуре к исследуемому в настоящей работе, получен также в [8]. Так как в условиях поверхностного СВЧ-разряда электрическое поле локализовано в тонком слое ( $h \sim 1$  мм) вблизи поверхности антенны, то газ в приповерхностных областях быстро нагревается. Это приводит к тепловому взрыву вблизи поверхности кварцевой антенны (позиция (1) на рис. 2), и формирование разряда сопровождается генерацией ударных волн (2), а на поздних стадиях в области существования разряда образуется каверна (3) — зона пониженной плотности нейтрального газа.

Зависимость продольной скорости распространения поверхностного СВЧ-разряда, усредненной за первые 10 мкс его существования, от давления воздуха при мощности 70 кВт приведена на рис. 3. Видно, что скорость распространения составляет несколько километров в секунду и монотонно уменьшается с увеличением давления воздуха. Этот результат вполне понятен, так как при фиксированной мощности, т.е. фиксированном значении напряженности электрического поля, такая важная для разряда величина, как приведенное электрическое поле  $E/n$  ( $n$  — концентрация молекул воздуха), монотонно уменьшается с увеличением давления воздуха, что и ведет к падению скорости.

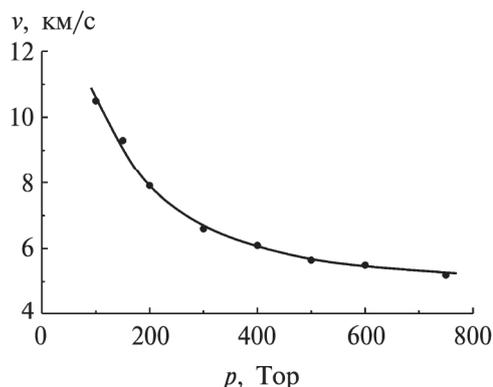


Рис. 3. Зависимость продольной скорости распространения поверхностного СВЧ-разряда от давления воздуха. Импульсная СВЧ-мощность  $W = 70$  кВт. Значение скорости усреднено за первые 10 мкс существования разряда

Данный тип разряда может найти практическое применение 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.).

Автор приносит благодарность профессорам А. Ф. Александрову и В. М. Шибкову и доцентам А. П. Ершову и В. А. Черникову за помощь в работе и полезное обсуждение полученных результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 05-02-16532).

#### Литература

1. Шибков В.М., Виноградов Д.А., Восканян А.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2000. № 6. С. 65 (Moscow University Phys. Bull. 2000. N 6. P. 80).
2. Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2004. № 5. С. 67 (Moscow University Phys. Bull. 2004. N 5. P. 64).
3. Шибков В.М., Ершов А.П., Черников В.А., Шибкова Л.В. // ЖТФ. 2005. **75**, № 4. С. 67.
4. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Шибкова Л.В. // ЖТФ. 2005. **75**, № 4. С. 74.
5. Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П. и др. // Физика плазмы. 2005. **31**, № 9. С. 857.
6. Двинин С.А., Шибков В.М., Михеев В.В. // Физика плазмы. 2006. **32**, № 7. С. 654.
7. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П. и др. // Физика плазмы. 2007. **33**, № 1. С. 77.
8. Gritsinin S.I., Kossyi I.A., Malykh N.I. et al. // Preprint of General Physics Institute of RAS. N 1. М., 1999.

Поступила в редакцию  
04.05.07