

## СВЧ РАЗРЯД НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕЛА

**В.М.Шибков, А.Ф.Александров, А.В.Восканян, А.П.Ершов,  
А.А.Кузовников, И.Б.Тимофеев, В.А.Черников, Л.В.Шибкова**

*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,  
119899, Москва, МГУ, физический факультет.  
shibkov@ph-elec.phys.msu.su*

В настоящей работе объектом исследования является принципиально новый тип СВЧ разряда на поверхностной волне [1-5]. Данный разряд может являться перспективным источником плотной, однородной плазмы большого диаметра для использования в технологических процессах микроэлектроники.

### Введение

Низкотемпературная плазма широко используется в новых технологических процессах субмикронной микроэлектроники, таких как травление, очистка поверхности, осаждение тонких пленок и ионная имплантация. Современные требования, накладываемые на источники плазмы, заключаются в следующем: большой диаметр плазмы ~300 мм, высокая однородность плазмы ~1-2 %, высокая концентрация ионов  $\sim 10^{11}$ - $10^{12}$  см<sup>-3</sup>, низкие энергии ионов ~1-10 эВ.

Наиболее перспективными источниками плазмы являются СВЧ источники на основе поверхностной волны. Главными преимуществами нагрева с помощью поверхностных СВЧ разрядов является отсутствие магнитного поля, и тот факт, что происходит прямая передача энергии электромагнитного поля непосредственно к электронам, что позволяет достичь высокой плотности заряженных частиц.

Известно, 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 плазменная среда 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  $n_{ec} = \frac{m(\omega^2 + \nu^2)}{4\pi e^2}$ , где  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона,  $\omega$  -

круговая частота поля,  $\nu$  - 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 создания плазмы и устройство для ее создания называются сурфатроном. Этот способ достаточно подробно исследован [6-10] 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.

Нами предложено создавать поверхностный СВЧ разряд вне диэлектрического тела, помещенного в барокамеру низкого давления [1-5], то есть предлагается как бы вывернуть рассмотренную выше систему наизнанку. В этом случае внутри располагается диэлектрик, на внешней поверхности которого создается плазма, существование которой поддерживается поверхностной СВЧ волной.

## Экспериментальная установка

Поверхностный СВЧ разряд, который является объектом исследования в работе, создавался на экспериментальном стенде, на котором в качестве источников СВЧ энергии использовался импульсный магнетронный генератор сантиметрового диапазона длин волн. Магнетронный генератор мог работать либо в однократном режиме, либо в режиме частых посылок СВЧ импульсов и имел следующие рабочие характеристики: длина волны  $\lambda=2,4$  см; отдаваемая в тракт импульсная мощность  $W<300$  кВт; длительность импульсов  $\tau=1-100$  мкс; скважность в режиме повторяющихся импульсов  $Q=1000$ . СВЧ энергия поступала в разрядную камеру по волноводному тракту прямоугольного сечения  $9,5 \times 19$  мм<sup>2</sup> через направленный ответвитель. Для избежания электрического пробоя весь тракт был герметизирован и наполнялся эле-газом при давлениях до 5 атмосфер. Разряд создавался в цилиндрической барокамере. Вакуумная система позволяла производить интересующие нас исследования в широком диапазоне давлений  $p=10^{-3}-10^3$  Тор. Внутренний диаметр вакуумной камеры - 30 см, длина - 40 см. Введенный в разрядную камеру конец волновода через специально разработанное устройство соединялся с изготовленной из диэлектрического материала антенной, на которой создавался поверхностный СВЧ разряд в воздухе. Разряд формировался на внешней поверхности диэлектрического тела прямоугольного сечения  $S=1 \times 2$  см<sup>2</sup> и длиной  $l=15$  см.

## Методы диагностики

Для измерения пороговых характеристик поверхностного СВЧ разряда регистрировались зависимости минимальной подводимой мощности, при которой начинает образовываться разряд на поверхности диэлектрического тела, от давления воздуха в барокамере при различных длительностях импульса. В экспериментах момент образования разряда фиксировался визуально или по появлению сигнала на экране осциллографа 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). Это позволило зафиксировать продольный размер поверхностного разряда и измерить продольную скорость его распространения при различных давлениях воздуха, длительностях и мощностях СВЧ импульсов.

Для исследования поверхностного СВЧ разряда желательно использовать бесконтактные методы и оптическая диагностика плазмы полностью удовлетворяет этому требованию. Колебательная температура определялась по относительной интенсивности полос второй положительной системы молекулярного азота и молекулярных полос CN. Температура газа определялась по распределению линий вращательной структуры полос второй положительной системы азота.

## Экспериментальные результаты

Общий вид СВЧ разряда на внешней поверхности диэлектрической антенны прямоугольного сечения  $1 \times 2$  см<sup>2</sup> и длины 15 см приведен на рис.1 и 2. Видно, что разряд представляет собой однородно светящуюся плазму, покрывающую при данных условиях всю поверхность диэлектрического тела.

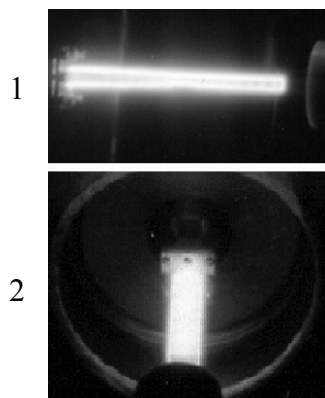


Рис.1.

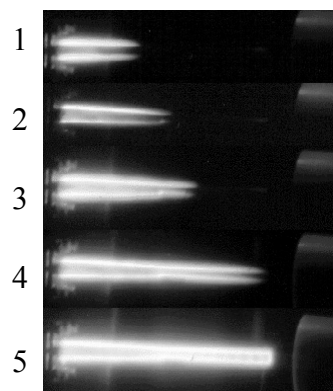
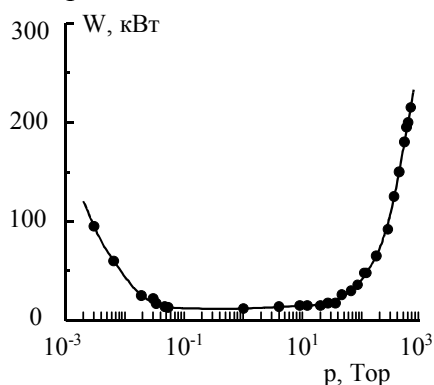


Рис.2.

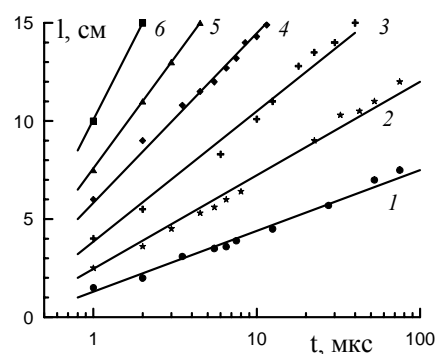
**Рис. 1.** Общий вид СВЧ разряда на внешней поверхности диэлектрической антенны при  $p=40$  Тор,  $\tau=50$  мкс и  $f=100$  Гц (1 – вид сбоку, 2 – вид сверху под углом  $45^\circ$  к вертикали).

**Рис.2.** Общий вид СВЧ разряда на внешней поверхности диэлектрической антенны при  $p=10$  Тор,  $W=50$  кВт,  $f=20$  Гц и при различных длительностях СВЧ импульса  $\tau$ , мкс: 1-2; 2-5; 3-10; 4-25; 5-50.

Были измерены пороговые характеристики, динамика развития разряда, измерены колебательная и газовая температуры, скорость нагрева газа, рассчитаны электродинамические характеристики разряда (пространственное распределение напряженности электрического поля, глубина проникновения поля в плазму, распределение концентрации электронов). Так на рис.3 можно видеть зависимость от давления воздуха минимальной СВЧ мощности, которая необходима для пробоя и начала формирования поверхностного разряда на внешней поверхности диэлектрического тела. Видно, что мощность используемого СВЧ генератора достаточна для формирования СВЧ разряда в широком диапазоне давления воздуха  $10^{-3}$ - $10^3$  Тор.



**Рис.3.** Зависимость минимальной импульсной СВЧ мощности, необходимой для создания поверхностного СВЧ разряда, от давления воздуха при  $\tau=1,5$  мкс и  $f=40$  Гц.



**Рис.4.** Зависимость продольных размеров поверхностного СВЧ разряда от длительности СВЧ импульса при  $p=10$  Тор,  $f=20$  Гц и СВЧ мощности  $W$ , кВт: 1-25; 2-35; 3-55; 4-75; 5-100; 6-175.

Продольные размеры поверхностного разряда в зависимости от длительности СВЧ импульса представлены на рис.4. Параметром этих кривых является СВЧ мощность. Видно, что размер разряда при фиксированной длительности растет с увеличением СВЧ мощности. При этом на начальной стадии существования поверхностного разряда продольная скорость достигает величины  $v=10^7$  см/с при  $W=200$  кВт, тогда как на поздних стадиях скорость распространения разряда уменьшается до  $v=10^4$  см/с при  $W=25$  кВт (рис.5).

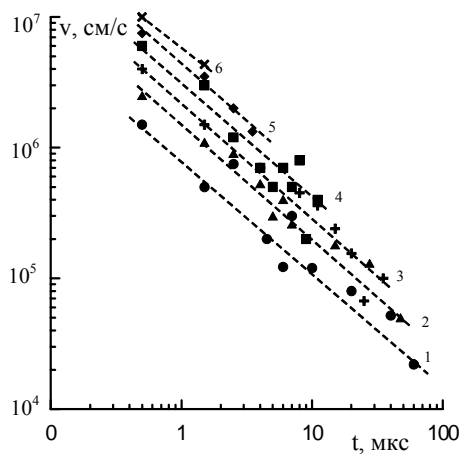


Рис. 5. Временная зависимость продольной скорости поверхностного СВЧ разряда при  $p=10$  Тор,  $f=20$  Гц и СВЧ мощности  $W$ , кВт: 1-25; 2-35; 3-55; 4-75; 5-100; 6-175.

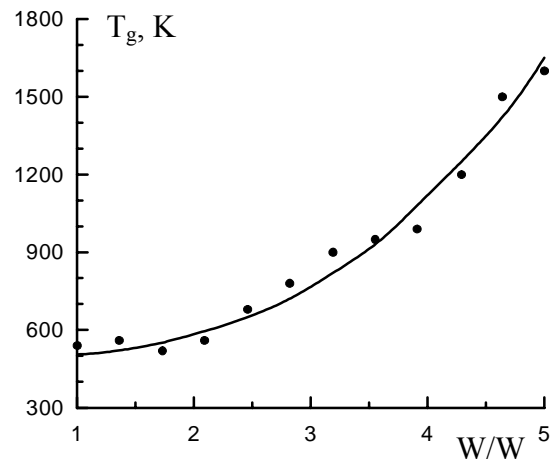


Рис. 6. Зависимость температуры газа поверхностного СВЧ разряда от мощности при  $p=40$  Тор,  $\tau=50$  мкс,  $f=40$  Гц и  $z=2,5$  см ( $W_b$  – пороговая мощность при давлении воздуха  $p=40$  Тор).

Получено, что температура газа увеличивается с ростом СВЧ мощности (рис.6), а на начальной стадии формирования разряда наблюдается быстрый нагрев газа со скоростью порядка 100 К/мкс.

Работа выполнена при финансовой поддержке EOARD (МНТЦ проект № 2248р) и РФФИ (проект № 02-02-17116).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В.М.Шибков, Д.А.Виноградов, А.В.Восканян, А.П.Ершов, И.Б.Тимофеев, Л.В. Шибкова, В.А. Черников. Поверхностный СВЧ-разряд в сверхзвуковом потоке воздуха. //Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика, астрономия. 2000. Т.41. №6. С.64-66.
2. V.M.Shibkov, A.V.Chernikov, V.A.Chernikov, A.P.Ershov, L.V.Shibkova, I.B.Timofeev, D.A.Vinogradov, A.V.Voskanyan. Surface microwave discharge on dielectric body in a supersonic flow of air. //IV International workshop Microwave discharges: Fundamentals and applications. 18-22 September 2000, Zvenigorod, Russia, Yanus-K, Moscow. 2001. P.145-153
3. V.M.Shibkov, A.V.Chernikov, V.A.Chernikov, A.P.Ershov, L.V.Shibkova, I.B.Timofeev, D.A.Vinogradov, A.V.Voskanyan. Surface microwave discharge in supersonic airflow. //The 2<sup>nd</sup> Workshop on Magneto-plasma-aerodynamics in aerospace applications. 5-7 April 2000, Moscow, IHT of RAS, 2001 p.163-168.
4. V.M.Shibkov, V.A.Chernikov, A.P.Ershov, S.A.Dvinin, Ch.N.Raffoul, L.V.Shibkova, I.B.Timofeev, D.M.VanWie, D.A.Vinogradov, A.V.Voskanyan. Surface microwave discharge in supersonic airflow. //32<sup>nd</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference and 4<sup>th</sup> Weakly Ionized Gases Workshop, 11-44 June 2001. Anaheim, CA, USA. AIAA 2001-3087.
5. V.M.Shibkov, V.A.Chernikov, S.A.Dvinin, A.P.Ershov, L.V.Shibkova, I.B.Timofeev, D.A.Vinogradov, A.V.Voskanyan. Dense large-diameter uniform plasma of a surface microwave discharge. //15<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Chemistry. Volume I. Oral Contributions. 9-10 July, 2001. France. P.179-184.
6. J.Marec, P.Leprince. Recent trends and developments of microwave discharges. //Journal de Physique IV. France. 1998. V.8. Pr7. P.21-32.
7. Moisan M., Zakrzewski Z. //J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. V.24. P.1025.
8. Daviaud S., Boisse-Laporte C., Leprince P., Marec J. //J. Phys.D: Appl.Phys. 1989. V.22. P.770.
9. Moisan M., Zakrzewski Z., Pantel R. //J. Phys.D: Appl. Phys. 1979. V.12, P.219.
10. Zakrzewski Z. //J. Phys.D: Appl. Phys. 1983. V.16. P.171.