

МЕХАНИЗМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СВЧ РАЗРЯДА ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ ВОЗДУХА

Л.В.Шибкова, А.В.Восканян, А.С.Двинин, А.П.Ершов,
А.А.Карачев, А.А.Кузовников, В.М.Шибков
*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
119899, Москва, МГУ, физический факультет.
shibkov@ph-elec.phys.msu.su*

В работе исследуется разряд при низких давлениях воздуха, создаваемый поверхностной СВЧ волной на внешней поверхности диэлектрической пластины. Данный способ создания СВЧ разряда может являться перспективным для разработки нового типа плазменного реактора для получения однородной плазмы большого объема, используемой в технологических процессах для микроэлектроники.

Введение

С целью создания источника плотной однородной неравновесной плазмы большого диаметра при низком давлении газа, используемого в технологических процессах субмикронной микроэлектроники, разрабатывается макет плазменного реактора на основе принципиально нового типа СВЧ разряда на поверхностной волне. Данный тип разряда был предложен на физическом факультете МГУ для создания плазмы в сверхзвуковом потоке воздуха при высоких давлениях газа $p=100-760$ Тор [1-5]. При этом разряд создается на внешней поверхности диэлектрической антенны. Он представляет собой плазменный волновод, по которому распространяется поверхностная волна, поддерживающая ионизацию газа. При этом в широком диапазоне частот можно получать плазменную область значительной протяженности и формы. Особенностью такого разряда являются принципиальная возможность создания сверхбольших размеров плазмы $d>300$ мм; принципиально сверхвысокая концентрация заряженных частиц, обусловленная тем, что разряд может гореть только при концентрациях электронов n_e больших, чем критическая $n_{кр}$ концентрации электронов. В нашем случае критическая концентрация электронов равна $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Предлагается использовать данный тип разряда для создания однородной плотной низкотемпературной плазмы низкого давления. При этом важнейшими преимуществами предлагаемого плазменного реактора по сравнению с используемыми в настоящее время являются высокая, превышающая критическую, концентрация электронов, возможность одновременной обработки нескольких пластин, отсутствие внешнего магнитного поля.

Экспериментальная установка

Поверхностный СВЧ разряд создавался с использованием в качестве источника СВЧ энергии импульсного магнетронного генератора сантиметрового диапазона длин волн. Магнетронный генератор мог работать либо в разовом режиме, либо в режиме частых посылок и имел следующие рабочие характеристики: длина волны $\lambda=2,4$ см; отдаваемая в тракт импульсная СВЧ мощность $W<300$ кВт; длительность СВЧ импульса $\tau=1-100$ мкс; скважность в режиме повторяющихся импульсов $Q=1000$, при этом средняя мощность не превышает 300 Вт. 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 ее генератору СВЧ во время импульса. СВЧ энергия поступала в разрядную камеру по волноводному тракту прямоугольного сечения $9,5 \times 19$ мм². Введенный в разрядную камеру конец волновода оканчивался специально

разработанными и изготовленными диэлектрическими антеннами либо диэлектрической пластиной, на внешней поверхности которых создавался поверхностный СВЧ разряд. Вакуумная система позволяла производить интересные нас исследования в широком диапазоне давлений от 10^{-3} до 10 Тор.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные данные показывают, что скорость распространения разряда вдоль поверхности диэлектрической антенны на несколько порядков меньше скорости распространения электромагнитной волны в вакууме. Такую скорость распространения разряда можно объяснить, если сопоставить ее со скоростью ионизации молекул газа, т.е. с созданием критической концентрации электронов. Движение фронта разряда могут обеспечивать следующие механизмы: амбиполярная диффузия, фотоионизация, теплопроводность (режим медленного горения), электронная теплопроводность и др.

На рис.1 представлены зависимости скорости распространения разряда вдоль диэлектрической антенны от продольной координаты (z). Как видно из рис.1, на всех кривых наблюдается характерный излом, который указывает на то, что на начальной и конечной стадии разряда за распространение отвечают различные механизмы.

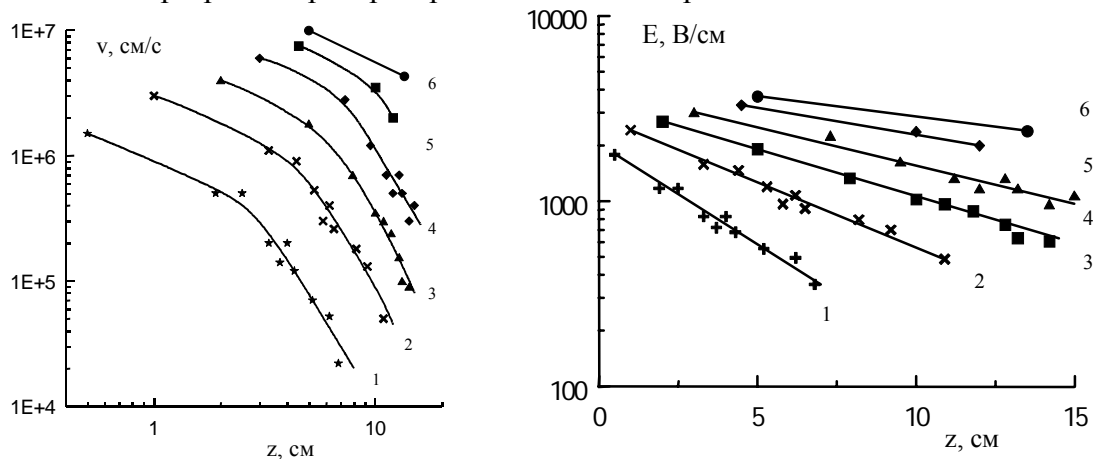


Рис.1. Зависимость скорости распространения разряда от продольной координаты для $p=10$ Тор и СВЧ мощности W , кВт: 1-25, 2-35, 3-55, 4-75, 5-100, 6-175.

Рис.2. Зависимость амплитуды напряженности электрического поля на фронте распространения поверхностной волны от продольной координаты для давления воздуха $p=10$ Тор и подводимой мощности W , кВт: 1-25, 2-35, 3-55, 4-75, 5-100, 6-175.

Распространение поверхностного СВЧ разряда за счет механизма медленного горения возможно только на поздних стадиях существования разряда. На стадии развития разряда наиболее вероятным механизмом распространения при низких давлениях газа может являться амбиполярная диффузия, а при высоких – фотоионизация и/или электронная теплопроводность. Для того, чтобы выяснить, какой из этих механизмов является определяющим, необходимо провести сравнение экспериментально полученных результатов с расчетными данными. Рассмотрим механизм движения разряда за счет амбиполярной диффузии. Известно, что температура электронов в исследованной плазме практически не меняется в процессе развития разряда, поэтому в пределах погрешностей эксперимента ее изменением можно пренебречь. Положим, что на переднем фронте разряда $T_e=2$ эВ, $T_i=T_g=300$ К. Если амбиполярная диффузия является доминирующим механизмом гибели заряженных частиц в плазме, то зависимость скорости v распространения поверхностного разряда от частоты ионизации ν_i определяется формулой: $v = 2(D_a \nu_i)^{1/2}$, где D_a – коэффициент амбиполярной диффузии, равный

$D_a = \frac{b_i k T_e}{e}$, где k – постоянная Больцмана, b_i – подвижность ионов, которая для воздуха

в [6] определена как: $b_i p = \frac{2,7 \sqrt{1 + M_g / M_i}}{\sqrt{(\alpha / a_0^3) 29 \cdot 10^{-3}}}$, здесь p – давление газа в Тор, $\alpha / a_0^3 = 11,54$.

Чтобы извлечь из экспериментальных данных значение амплитуды напряженности электрического поля, воспользуемся зависимостью $v_i = f(E_0 / n_g)$, приведенной в [7,8]. В результате для давления воздуха $p = 10$ Тор получаем формулу: $E_0 = 45,3 \cdot v^{0,382}$ (здесь размерность напряженности электрического поля [В/см], а размерность скорости [м/с]).

На рис.2 представлены зависимости амплитуды напряженности электрического поля от продольного размера разряда для давлений 10 Тор. Параметром кривых является СВЧ мощность, подводимая к антенне. В условиях эксперимента при подводимой мощности 175 кВт напряженность электрического поля в волноводе равна ~8 кВ/см. Как можно заметить, полученные результаты не только не противоречат, но и хорошо совпадают с данной величиной поля в волноводе. Для более высоких давлений были получены результаты, явно противоречащие расчетным данным. Так, к примеру, для давления 100 Тор амплитуда напряженности электрического поля в поверхностном разряде, рассчитанная в приближении распространения разряда за счет амбиполярной диффузии, достигает 15 кВ/см, что противоречит экспериментальным условиям.

Рассмотрим распространение разряда за счет механизма электронной теплопроводности. В этом случае зависимость напряженности электрического поля от

скорости распространения разряда имеет вид: $v = \frac{\sqrt{\chi_e \sigma T_e}}{\frac{3}{2} k T_e n_e} E_0$, где $\chi_e = 2,56 \cdot 10^{-2} \frac{T_e^{5/2}}{\ln \Lambda}$ -

коэффициент электронной теплопроводности в [Вт/см·К], T_e – температура электронов в [эВ]. Для воздуха $\chi_e = 1,93$ Вт/м·К, $\frac{\sigma p}{n_e} = 7,2 \cdot 10^{-18} \left[\frac{\text{Тор} \cdot \text{м}^2}{\text{Ом}} \right]$, где σ - электронная

проводимость. Окончательно получаем $E_0 = 1,46 \cdot 10^{-5} \sqrt{p} v$, где размерность скорости [м/с], давления - [Тор], а напряженности электрического поля [В/см]. При давлении $p = 100$ Тор и скорости распространения разряда $v = 10^5$ м/с максимальная амплитуда поля, полученная в предположении, что распространение разряда обеспечивается за счет электронной теплопроводности, равна 14,6 В/см. Таким образом, полученные значения поля противоречат условиям эксперимента и, соответственно, механизм электронной теплопроводности не обеспечивает распространение разряда для всего диапазона исследованных давлений. Были проведены также эксперименты по созданию поверхностного СВЧ разряда на плоской пластине. Для этого использовалась пластина из тефлона толщиной 1 см, длиной 14 см и шириной 20 см. В месте возникновения плазмы происходит трансформация подводимой СВЧ энергии в поверхностную волну, которая распространяется во всех направлениях, создавая на поверхности диэлектрика тонкий ~1 мм слой однородно светящейся плазмы. С увеличением мощности все большая часть поверхности пластины покрывается плазмой. Скорость распространения разряда на пластине также зависит от длительности и мощности СВЧ импульса, как и скорость распространения разряда на антенне. Так при мощности $W = 350$ кВт за время $t = 1$ мкс поверхностный СВЧ разряд покрывает всю пластину площадью 14×20 см².

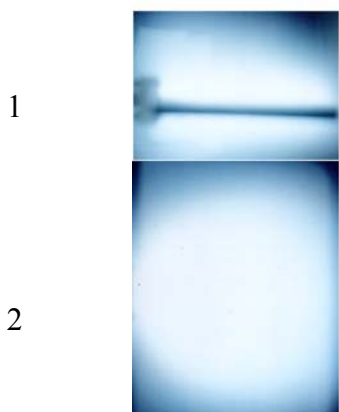


Рис. 3.

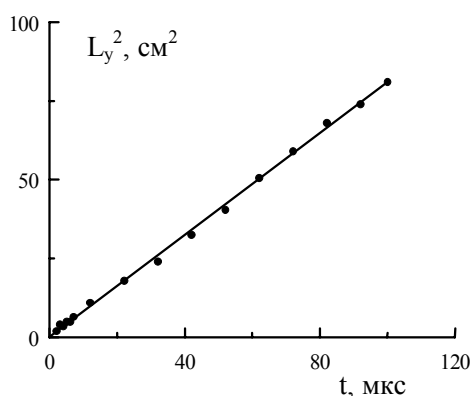


Рис. 4.

Рис. 3. Общий вид поверхностного СВЧ разряда (1 – вид сбоку, 2 – вид сверху) на диэлектрической пластине при $p=7 \cdot 10^{-3}$ Тор, $\tau=50$ мкс, $f=20$ Гц, $W=100$ кВт.

Рис. 4. Зависимость квадрата поперечного размера L_y^2 разряда от длительности СВЧ импульса при $p=5 \cdot 10^{-3}$ Тор.

Типичный внешний вид разряда при низком давлении воздуха показан на рис.3. Как видно, в рассматриваемых условиях разряд занимает всю пластину. В поперечном направлении его размер достигает величины порядка 10 см. С ростом давления этот размер быстро уменьшается. Очевидно, что в формировании поперечного к поверхности профиля плазмы большую роль играет амбиполярная диффузия заряженных частиц. Действительно, для оценки размера плазмы в этом направлении можно написать: $L_y=(D_a\tau)^{1/2}$, где D_a - коэффициент амбиполярной диффузии, τ - длительность СВЧ импульса. В эксперименте фиксировались поперечные размеры разряда при различных значениях длительности СВЧ импульса. Полученные данные (см. рис.4) позволили определить коэффициент амбиполярной диффузии и оценить электронную температуру. При давлении воздуха $5 \cdot 10^{-3}$ Тор экспериментально найденное значение температуры электронов $T_e \approx 2$ эВ, а концентрации электронов $n_e = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

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 2nd 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. //32nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference and 4th 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. //15th International Symposium on Plasma Chemistry. Volume I. Oral Contributions. 9-10 July, 2001. France. P.179-184.*
6. Ю.П.Райзер. *Физика газового разряда. 1987. М. Наука. С.591.*
 7. А.В.Гуревич. *Ионизация нижней ионосферы под действием мощных радиоимпульсов. //Геомagnetизм и аэрономия. 1979. Т.9, N4. С. 633-640.*
 8. J.T.Mayhan. *Comparison of various microwave breakdown prediction models. //J.Appl.Phys. 1971. V.42. N13. P.5362-5369.*