

04;09
©1994

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И КИНЕТИКИ СВЧ СТРИМЕРА В АЗОТЕ И ВОЗДУХЕ

П.В.Веденин, Н.А.Попов

1. СВЧ разряд высокого давления представляет собой плазменное образование, состоящее из ярко светящихся каналов, ориентированных преимущественно вдоль внешнего электрического поля [1]. Имеющиеся экспериментальные данные [2-4] указывают на наличие в каналах разряда плотной ($N_e > 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при $P > 300 \text{ Тор}$) горячей плазмы, значительно деформирующей поле падающей электромагнитной волны.

Теоретические исследования процесса контракции СВЧ разрядов проводились в основном в рамках модели ионизационно-перегревной неустойчивости (см. обзор [1] и работы [4-5]). На недостаточность такого описания указано, в частности, в [6,7], где предложен стримерный механизм развития СВЧ разрядов высокого давления.

В работах [8,9] сообщается о результатах двумерного численного моделирования начального этапа эволюции СВЧ стримера. Кроме того, в [9] предложена аналитическая модель, позволяющая описать распределение амплитуды электрического поля внутри и вне стримерного канала. Следует отметить, что в [8,9] для описания проводимости плазменного канала использовалась сильно упрощенная система химических реакций.

В данной работе на основе аналитических соотношений [9] совместно с достаточно полной системой плазмохимических реакций исследована двумерная динамика плазменного образования в надпробойном поле E_v на электростатической стадии. Определены значения параметров плазменного канала, которые сравниваются с данными экспериментов.

2. В модели рассматривается эволюция плазменного облака, образованного в результате пробоя газа в поле линейно поляризованной электромагнитной волны $E_v = (0, E_v, 0)$. Этап симметричного разлета созданной плазмы длится, пока она прозрачна для падающего излучения. При этом за время τ проводимость плазменной области σ и ее

характерный размер возрастают соответственно до значений $\sigma_0(\tau) \leq \omega/4\pi$ и $R_0 = 3.5\sqrt{D_a\tau}$, где D_a — коэффициент амбиполярной диффузии, $\gamma = v_i - v$, v_i и v_a — соответственно частоты ионизации электронным ударом и прилипания, $\gamma\tau = 20 - 30$.

Момент времени τ принимался за начало отсчета. Газ в начальный момент времени считался невозмущенным. Значение начальной проводимости $4\pi\sigma_0/\omega$ варьировалось в расчетах от 0.2 до 0.5.

Результаты численных расчетов [9] позволяют принять следующие предположения. Пространственное распределение концентрации электронов в течение всего расчетного времени имеет вид

$$N_e(x, y, t) = N_e^0(t) \begin{cases} 1, & S_0(t) \leq S(t) \leq 1, \\ S(t)/S_0(t), & 0 \leq S(t) \leq S_0(t), \\ 0, & S(t) < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $N_e^0(t)$ — значение концентрации электронов в точке $(0,0)$, $S(t) = 1 - (x/l_x(t))^2 - (y/l_y(t))^2$, $S_0 = \Delta_y(2 - \Delta_y/l_y)/l_y$ — характерный размер изменения концентрации электронов вдоль оси OY . Предполагалось, что на электростатической стадии удлинения стримера $\Delta_y(t) = R_0 = \text{const}$.

Рост концентрации электронов приводит к преимущественному вытягиванию плазмоида вдоль внешнего электрического поля вследствие поляризации созданной плазмы. Скорости удлинения и расширения плазмоида связаны с локальными значениями температуры электронов T_e^y , T_e^x в точках $(0, \pm l_y)$, $(\pm l_x, 0)$ следующими соотношениями:

$$dl_y/dt = 2g\sqrt{D_a(T_e^y)\gamma(T_e^y)}, \quad dl_x/dt = 2\sqrt{D_a(T_e^x) \cdot \gamma(T_e^x)}, \quad (2)$$

Величина $q = 1 - 2$ определена в работе [9].

Выражения для напряженности поля в точках $(\pm l_x, 0)$, $(0, \pm l_y)$, $(0, 0)$, необходимые для определения соответственно dl_x/dt , dl_y/dt (2), а также для определения $dN_e^0(t)/dt$ (в рамках системы плазмохимических реакций п. 3), имеют в электростатическом пределе $2l_y \leq \lambda/\pi$ вид [9]

$$\frac{|E_x(\pm l_x, 0)|^2}{|E_0|^2} = 1 + \frac{\theta}{(L+1)^2}, \quad |E_0(0, 0)|^2 = E_v^2/(1+\theta),$$

$$\frac{|E_y(0, \pm l_y)|^2}{|E_0|^2} = 1 + \theta \left(1 + \frac{\rho L^4}{(L+1)(L-1)^2} \times \right. \\ \left. \times \left(2 \left[\sqrt{\rho^2(1-S_0) + 1 - \rho} \right] - \sqrt{S_0(1-1/L^2)} \right) \right)^2.$$

Здесь $L = l_y/l_x$, $\theta = \sigma_*^2/(L+1)^2$, $\sigma_* = 4\pi\sigma(N_e^0)/\omega$, $\rho = (L\sqrt{S_0})^{-1}$, причем при $L \gg 1$ $\rho \simeq \sqrt{r_0/2\Delta_y}$, где r_0 — радиус кривизны головки стримера. Отметим, что параметр $(L+1)^{-1}$ совпадает с коэффициентом деполяризации для однородного двумерного плазменного эллипсоида [10].

3. В рассматриваемой плазмохимической модели использовались данные [11,12] для скоростей ионизации и возбуждения молекул N_2 , O_2 электронным ударом (с учетом ударов второго рода). При исследовании процессов с участием заряженных частиц учитывалось шесть сортов ионов: O_2^+ , O_4^+ , N_4^+ , NO^+ , O^- , O_2^- . Динамика нейтральных компонент азотно-кислородной смеси описывалась системой уравнений баланса для концентраций следующих частиц: $N(^4S)$, $N_2(A^3\Sigma_u)$, $N_2(C^3\Pi_u)$, $N_2(B^3\Pi_g, B'^3\Sigma_u, W^3\Delta_u)$, $N_2(a^1\Pi_g, a'^1\Sigma_u, w^1\Delta_u)$, NO , $N(^2D)$, $O(^3P)$, $O(^1D)$, $O(^1S)$, $O_2(a^1\Delta_g)$, $O_2(b^1\Sigma_u)$, O_3 , а также уравнений для температуры газа и колебательных температур N_2 , O_2 и O_3 . Детальное описание кинетической схемы, а также результаты тестовых расчетов и их сравнение с данными экспериментов приведены в [13].

4. С использованием изложенной выше модели исследованы процессы, инициируемые пробоем азота ($P = 15-50$ Тор) и воздуха ($P = 760$ Тор) в поле СВЧ излучения с параметрами [4] и [5] соответственно. В расчетах длительность импульса определялась из условия $2l_y \leq \lambda/\pi$.

На рис. 1, а приведены результаты расчетов и экспериментальные данные [5] по динамике вытягивания СВЧ стримера вдоль внешнего электрического поля. Для сравнения этих данных с результатами расчетов соответствующие зависимости $l_y(t)$ согласовывались в области быстрого изменения $l_y(l_y = 10 \pm 0.1$ см), которая хорошо разрешается в эксперименте. За это время значения $l_x(t)$ меняются от $R_0 = 0.05$ до 0.2 мм. Величина скорости удлинения плазмоида вдоль внешнего поля при $t \geq 65$ нс превышает $6 \cdot 10^7$ см/с, что согласуется с данными [5] ($\sim 10^8$ см/с).

На рис. 1, б показаны временные зависимости приведенного электрического поля на полюсах E_y/N (кривая 1) и

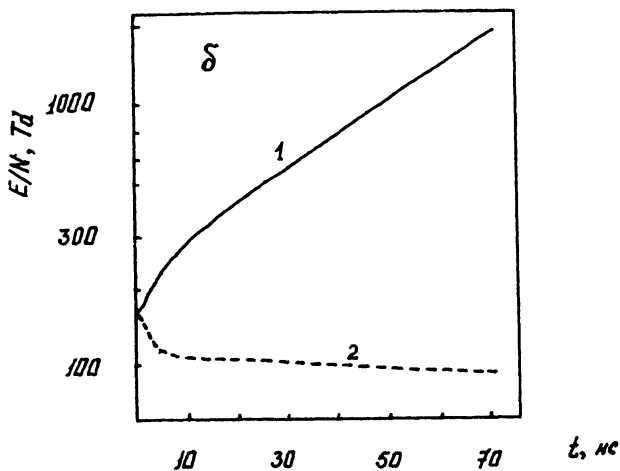
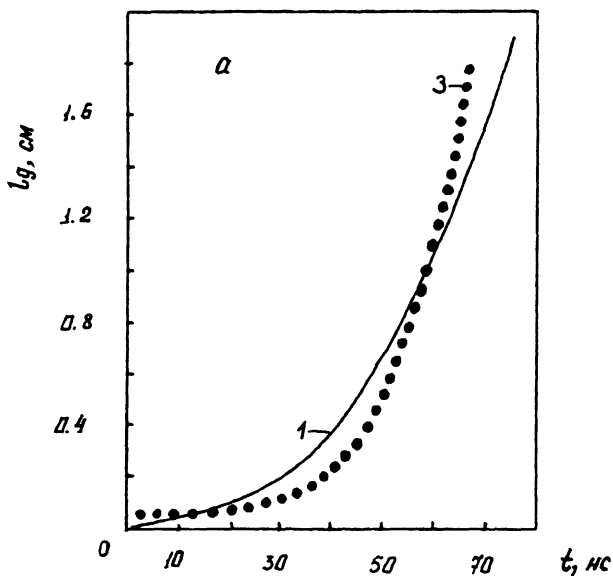


Рис. 1. Зависимость от времени (а) длины СВЧ стримера и (б) приведенных электрических полей на его головке E_y/N (1) и в центре E_0/N (2) для условий экспериментов [5]: $P = 760$ Тор, $E_v/N = 160$ Td, $\tau_{\text{имр}} = 70$ нс, $\lambda = 10$ см, 3 — данные [6]; $4\pi\sigma_0/\omega = 0.5$, $\gamma\tau = 25$.

в центре плазмоида E_0/N (кривая 2). На заключительной стадии роста стримера усиление поля на его головке составляет $E_y/E_0 \geq 30$.

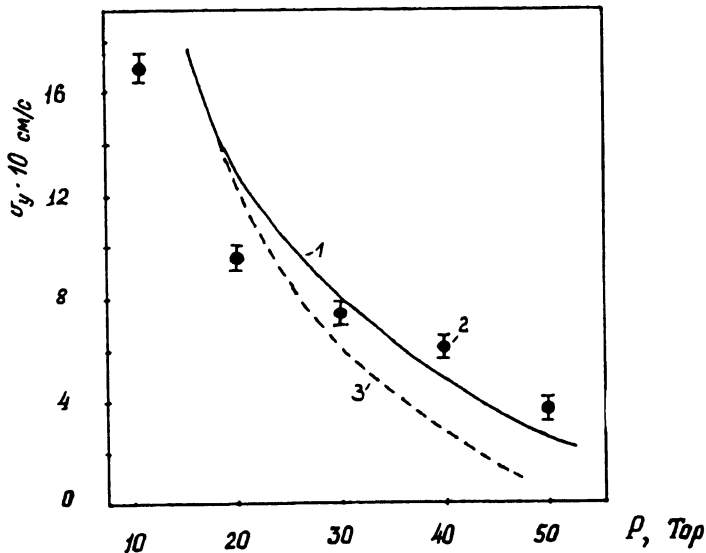


Рис. 2. Зависимость скорости вытягивания плазмоида от давления азота для условий [4]:

$E_v = 2.1$ кВ/см, $\lambda = 4$ см; 2 — данные экспериментов [4], 1 и 3 — результаты расчетов с учетом и без учета реакций ассоциативной ионизации соответственно.

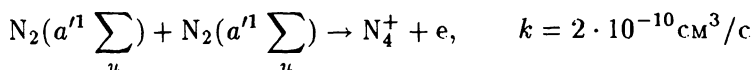
Концентрация электронов в канале стримера достигает величины $N_e \sim 8 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, а степень диссоциации кислорода 20–25%, что определяет особенности дальнейшей эволюции рассматриваемой смеси. Нагрев газа на разрядной стадии составляет 100–500 К и связан с протеканием реакции:



в которой до 70% энергии возбуждения $O(^1D)$ идет на нагрев смеси [13]. При $t \geq 150$ нс происходит интенсивный рост температуры за счет реакции VT-релаксации $N_2(vib)$ на атомах кислорода, что может привести к развитию ионизационно-перегревной неустойчивости.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные и результаты расчетов зависимости скорости удлинения плазмоида от давления газа для условий [4]: азот, $P = 15-50$ Торр, $E_v = 2.1$ кВ/см, $\lambda = 4$ см. С ростом давления и уменьшением значения E_v/N падает частота ионизации и соответственно скорость вытягивания стримера. Концентрация электронов в канале стримера достигает величины $N_e = (1-2) \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$ для $P \geq 30$ Торр. При этом

энерговклад, увеличиваясь с ростом давления, не превышает 0.1 эВ/молек. Отношение l_y/l_x достигает значений 4–4.6, что согласуется с данными экспериментов [4]. Следует отметить, что учет реакций ассоциативной ионизации [14]



заметно увеличивает частоту ионизации в канале стримера на этапе, когда существенна поляризация созданной плазмы. В результате увеличивается скорость его распространения при давлениях $P \geq 30$ Тор (рис. 2). При меньших давлениях, за счет увеличения начального размера плазоида ($R_0/\lambda \geq 0.2 - 0.3$), снижается влияние процессов поляризации, в частности l_y/l_x становится меньше 3. В итоге поле в центре стримера на всех этапах эволюции превышает пробойное значение и влияние процессов ассоциативной ионизации малó.

Авторы благодарят Ю.Ф.Колесниченко и Н.Е.Розанова за полезные дискуссии.

Список литературы

- [1] Витарев А.Л., Гильденбург В.Б., Ким А.В. и др. В сб.: ВЧ разряд в волновых полях. ИПФ АН СССР. Горький, 1988. С. 41.
- [2] Грицинин С.И., Дорофеев А.А., Косый И.А., Магунов А.Н. // ТВТ. 1987. Т. 25. В. 6. С. 1068.
- [3] Злобин В.В., Кузюков А.А., Шибков В.М. // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. 1988. Т. 29. В. 1. С. 89.
- [4] Витарев А.Л., Горбачев А.М., Ким А.В., Колюшко А.Л. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. В. 3. С. 1064.
- [5] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // Препринт ФТИ им.А.Ф.Иоффе 1577. 1992. 57 с.
- [6] Двинин С.А. // Вестник МГУ. Сер. 3. 1985. Т. 26. В. 6. С. 30.
- [7] Колесниченко Ю.Ф. В кн.: Радиационно-плазмохимические методы в экологии. М., 1989. С. 24.
- [8] Гильденбург В.Б., Гуцин И.С., Двинин С.А., Ким А.В. // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. В. 4. С. 1151.
- [9] Веденин П.В., Розанов Н.Е. // ЖЭТФ. 1994. Т. 105. В. 4. С. 868.
- [10] Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М., 1982. 624 с.
- [11] Александров Н.Л., Высикайло Ф.И., Исламов Р.Ш. и др. // ТВТ. 1981. Т. 19. В. 1. С. 22.
- [12] Ali A.W. // Laser and Part. Beams. 1988. V. 6. N 1. P. 105.
- [13] Попов Н.А. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. В. 3. С. 109.
- [14] Brunet H., Rocca-Serra J. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. P. 1574.

Вычислительный центр РАН
Москва

Поступило в Редакцию
25 декабря 1993 г.
В окончательной редакции
21 марта 1994 г.