

04;13

## Исследование динамики формирования разряда дипольного типа методом рассеянной СВЧ-волны

© В.Г. Бровкин, В.А. Битюрин, П.В. Веденин

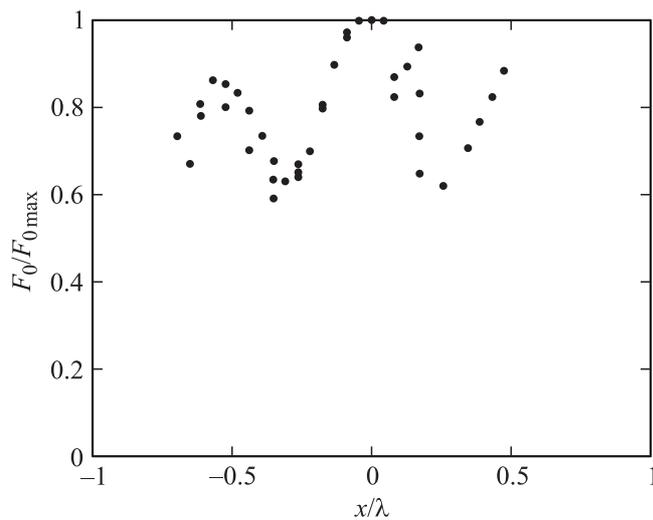
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва  
E-mail: brovkin47@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 сентября 2013 г.

В воздухе в диапазоне давлений  $(1-1.4) \cdot 10^4$  Па вблизи порога пробоя экспериментально с помощью рассеянной СВЧ-волны исследовалась эволюция плазменной структуры, состоящей из цепочки выстраивающихся в линию тонких по сравнению с длиной волны плазменных диполей. Анализ динамики рассеянного излучения позволил выявить основные этапы развития как одиночного плазменного образования, так и всей структуры; получить данные о средней скорости удлинения каналов (СВЧ-стримеров) вдоль внешнего электрического поля  $E_0$ , а также о средней скорости распространения фронта области разряда навстречу источнику излучения.

Одним из многочисленных путей эволюции СВЧ-разряда в газах повышенного давления ( $\nu > \omega$ ,  $\nu$  — транспортная частота столкновений электронов,  $\omega$  — круговая частота электромагнитного поля) является формирование регулярных пространственных структур, состоящих из цепочки(ек) тонких по сравнению с длиной волны  $\lambda$  вытянутых вдоль внешнего электрического поля  $E_0$  плазменных каналов (см. [1] и упомянутую там литературу, [2]). Видимая на фотографиях длина каналов (плазмOIDов) близка к  $0.5\lambda$ . Разряд распространяется скачками навстречу источнику излучения. В основе механизма распространения лежит интерференция падающей и рассеянных на плазмOIDах электромагнитных волн. Исследование динамики развития плазменных структур проводилось посредством скоростной фотокамеры и регистрации рассеянной СВЧ-волны.

В работах [3,4] информация, полученная с помощью рассеянного излучения, использовалась для изучения особенностей развития СВЧ-стримера [3], а также при нахождении установившихся (квазистаци-

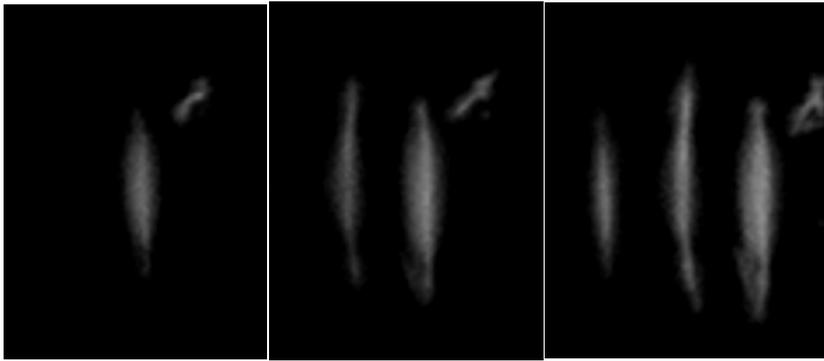


**Рис. 1.** Нормированное продольное (вдоль оси камеры) распределение функции  $F \propto |\mathbf{E}_0(\mathbf{r})|^2$ .

онарных) значений интегральных характеристик сформировавшегося плазмоида [4]: амплитуд дипольного момента, полного заряда и усредненного по длине тока, эффективной поверхности рассеяния.

В данном сообщении продемонстрированы некоторые возможности метода исследования динамики плазменных структур по рассеянному излучению применительно к цепочке выстраивающихся в линию и отстоящих друг от друга на расстояние примерно  $\lambda/4$  плазмоидов.

Эксперименты проводились в воздухе в слабо надпробойном электрическом поле в диапазоне давлений  $(1-1.4) \cdot 10^4$  Па. Источником СВЧ-излучения служил работающий в импульсном режиме магнетрон, импульсная мощность которого не превышает 700 kW,  $\lambda = 2.3$  см, длительность импульсов  $\tau_p = 1-7 \mu\text{s}$ . По волноводному тракту СВЧ-мощность поступала в разрядную камеру, где с помощью рупорной антенны формировался слабо расходящийся волновой пучок. Перехваченное сферическим зеркалом линейно поляризованное излучение направлялось обратно вдоль оси камеры (оси  $x$ ) навстречу волновому пучку. Рис. 1 демонстрирует нормированное продольное распределение функции  $F \propto |\mathbf{E}_0(x)|^2$  в области фокуса.



**Рис. 2.** Интегральные фотографии разряда в плоскости **kE** ( $\tau_{exp} = 2\mu s$ ). Разряд распространяется влево в сторону зеркала.

Область локализации первого плазменного канала (изначального элемента структуры) в малой окрестности фокуса стабилизировалась с помощью распространявшегося вдоль вектора электрического поля  $E_0$  зеленого луча неодимового лазера, создававшего начальный фон электронной концентрации.

Динамика разряда исследовалась на основании анализа материалов фоторегистрации, сигналов рассеянного СВЧ-излучения и оптического излучения из области разряда.

Фотографирование производилось скоростной камерой PCO.SENSICAM со временем экспозиции  $1-4\mu s$  в плоскостях **kE** (плоскость  $y = 0$ ) и **kB** (плоскость  $z = 0$ ). На основании фотоматериалов оценивались тип формирующейся структуры, ее характерные пространственные масштабы и размеры плазмоидов. Динамика интенсивности свечения отслеживалась с помощью ФЭУ. Рассеянное СВЧ-излучение принималось установленной вдоль внешнего поля антенной (открытый конец центральной жилы кабеля) и детектировалось. Приемная антенна перемещалась в „волновой зоне“ вдоль оси камеры. Сигналы с ФЭУ и с детектора поступали на 4-лучевой запоминающий осциллограф типа TDS 3014B.

Исследование показало, что в рассматриваемом диапазоне давлений формируется один и тот же тип плазменной структуры: цепочка плазменных диполей. Интегральные фотографии разряда в плоскости **kE** на различных этапах развития представлены на рис. 2.

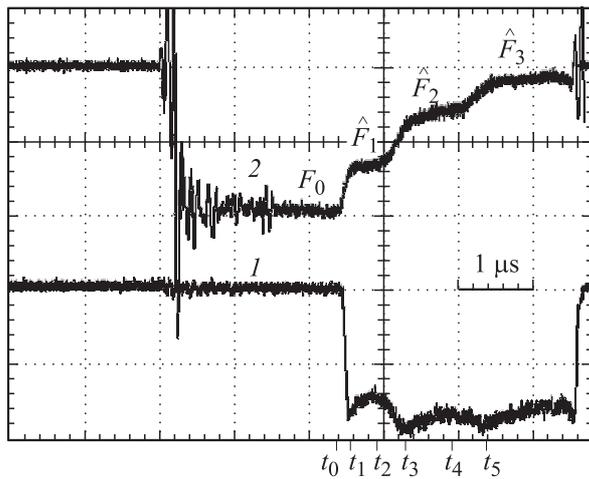


Рис. 3. Осциллограммы с ФЭУ (1) и с приемной антенны (2).

На рис. 3 приведены осциллограммы с ФЭУ и с приемной антенны ( $F \propto |\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_{sc}|^2$ ,  $\mathbf{E}_{sc}$  — рассеянное поле), значительно дополняющие общую картину эволюции разряда. Осциллограммы отчетливо выявляют основные этапы развития как одиночного плазменного образования, так и всей структуры за время СВЧ-импульса  $\tau_p \approx 5 \mu\text{s}$ .

В начале развития 1-го плазменного канала  $t < t_0 \approx 2.4 \mu\text{s}$  его размеры и концентрация электронов еще столь малы, что вклад рассеянного излучения практически не виден на стационарном фоне  $F_0 \propto |\mathbf{E}_0|^2$ . Этот этап эволюции плазменного облака (лавинное размножение электронов во внешнем поле) продолжается до тех пор, пока пренебрежимо мало влияние поля пространственных зарядов, расположенных в полярных областях.

Динамические этапы быстрого изменения функции  $F(t)$  ( $\delta t_{str m} = t_{2m-1} - t_{2m-2}$ ,  $m = 1-3$  — номера плазменных образований) естественно связать с развитием стримеров, когда размеры и концентрация электронов резко нарастают. Средние скорости удлинения СВЧ-стримеров, оцененные из соотношения

$$\bar{v}_{str m} \approx \frac{\lambda}{4\delta t_{str m}}, \quad (1)$$

заметно уменьшаются  $\bar{V}_{str\ 1-3} \approx 3, 1.7, 1.4 \cdot 10^6$  cm/s по мере их отдаления от фокуса. Из фотографий видно, что даже после окончания динамических этапов продольный  $2l$  и поперечный  $2a_x$  размеры первого и второго каналов продолжают медленно нарастать.

На квазистационарных этапах  $t = t_1 - t_2$ ,  $t = t_3 - t_4$ ,  $t > t_5$ , начинающихся после прекращения интенсивного удлинения стримеров, в практически уже сформировавшихся плазмоидах, как показали расчеты [5], устанавливается ионизационно-рекомбинационное квазиравновесие. Об этом свидетельствуют слабые изменения уровней сигналов  $\hat{F}_m$ . В промежутке времени  $t = t_1 - t_2$  ( $t = t_3 - t_4$ ) на расстоянии  $\delta_x \approx \lambda/4$  от первого (второго) плазоида в максимуме суммарного электрического поля  $|\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_{sc}| > E_{br}$  зарождается второй (третий) канал. Начальная электронная концентрация в нем определяется балансом процессов ударной ионизации, прилипания и фотоионизации (УФ-излучением из предыдущих плазмоидов). Из осциллограммы рассеянного СВЧ-излучения явствует, что к моменту времени  $t_5$  завершения формирования третьего канала уровень сигнала  $\hat{F}_3$  уже значительно меньше начального значения  $F_0$ . Следовательно, в точке приема справедливо приближенное равенство амплитуд  $|\mathbf{E}_0| \approx |\mathbf{E}_{sc}|$ , но рассеянное плазмоидами электрическое поле колеблется в противофазе с внешним полем.

Полученные данные позволяют оценить среднюю скорость распространения фронта

$$\bar{V}_{xm} \approx \frac{\delta_x}{t_{2m-1} - t_{2m-3}}, \quad m = 2, 3 \quad (2)$$

области разряда  $\bar{V}_{x2} \approx 9 \cdot 10^5$  cm/s и  $\bar{V}_{x3} \approx 5 \cdot 10^5$  cm/s. Причина замедления фронта, как уже упоминалось, — это продвижение плазменной структуры в направлении уменьшения напряженности внешнего электрического поля.

Временная зависимость свечения на осциллограмме с ФЭУ полностью соответствует поведению кривой  $F(t)$  на начальном и динамическом этапах. Ослабление светового потока в конце динамических этапов происходит, по нашему мнению, вследствие резкого уменьшения амплитуды поля в центре стримера  $|E_{cm}|$ , о котором свидетельствуют расчеты, проведенные в рамках интегральной электродинамической модели СВЧ-стримера [5]. Интенсивность свечения спадает, достигает минимального значения, а затем снова начинает расти по мере развития нового плазменного образования.

В заключение отметим, что предложенный метод демонстрирует дополнительные возможности в экспериментальной практике изучения СВЧ-разрядов и может быть применен в исследовании динамики более сложных плазменных структур.

Авторы выражают благодарность Н.М. Рязанскому за помощь, оказанную при проведении экспериментов.

## Список литературы

- [1] *Веденин П.В., Попов Н.А.* // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. В. 1. С. 49–63.
- [2] *Hidaka Y., Choi E.M., Mastovsky I. et al.* // IEEE Transactions on plasma science. 2008. V. 36. P. 936.
- [3] *Бровкин В.Г., Битюрин В.А., Веденин П.В.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 1. С. 96–106.
- [4] *Бровкин В.Г., Битюрин В.А., Веденин П.В.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 21. С. 37–44.
- [5] *Битюрин В.А., Веденин П.В.* // ЖЭТФ. 2010. Т. 108. В. 3. С. 577–587.