



Особенности лавинно-стримерного перехода в однородном и неоднородном электрическом поле

Стишков Ю.К., Самусенко А.В., Пек Б.Э.

Газовая смесь: 76% N₂ и 24% O₂. В модели учитывалось 45 реакций: упругое столкновение молекул с электроном, ионизация молекул, диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов в основное состояние, диссоциация молекул, реакции возбуждения электронных и колебательных уровней, ион-ионная рекомбинация, а также реакции прилипания и отлипания электронов в кислороде.

Система уравнений:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \left(\sum_i q_i Y_i \frac{\rho_{\text{св}}}{m_i} + q_e n_e \right)$$

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} + \text{div}(\mu_i Y_i \nabla \varphi - D_i \nabla Y_i) = S_i$$

$$\left\{ \begin{aligned} V \frac{\partial f_0}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\chi \left(\nabla f_0 + \nabla \varphi \frac{\partial f_0}{\partial E} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial E} \left[\chi \nabla \varphi \cdot \left(\nabla \varphi \frac{\partial f_0}{\partial E} + \nabla f_0 \right) \right] \right\} &= V S \\ \vec{f}_1 &= -\frac{V}{v} \nabla f_0 - (\nabla \varphi) \frac{V}{v} \frac{\partial f_0}{\partial E} \\ \chi &= \frac{V^3}{3v} \\ E &= \frac{m_e V^2}{2e} \end{aligned} \right.$$

Y_i – массовая доля i -го типа частиц

f_0 – функция распределения электронов по координатам и энергии

f_1 – первая поправка к изотропной функции f_0

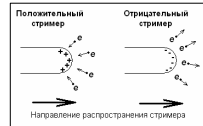
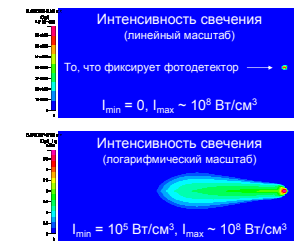
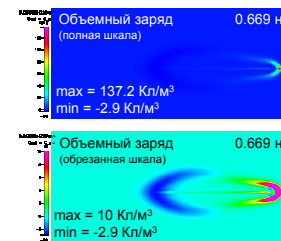
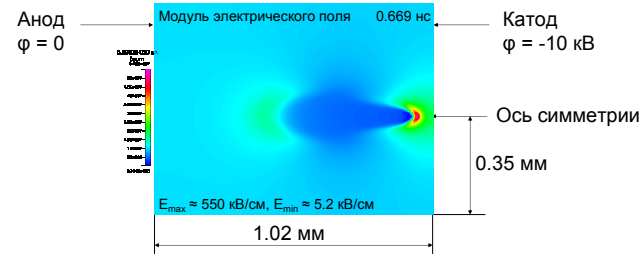
Выводы:

■ Все стримеры, полученные в результате моделирования, являются либо положительными (катодонаправленными), либо присутствуют оба стримера, причем у отрицательного (анодонаправленного) стримера интенсивность реакций ионизации на два порядка меньше.

■ У положительного стримера головка сужается в процессе прорастания, а у отрицательного – расширяется.

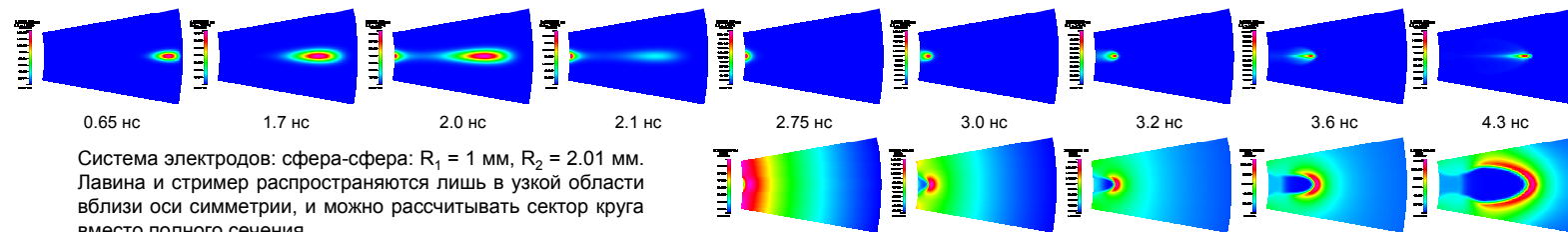
■ У положительного стримера есть четко выраженный плазменный канал, поле в котором сильно понижено.

■ Скорость прорастания положительного стримера, образовавшегося в межэлектродном промежутке меньше скорости прорастания отраженного стримера, прорастающего от катода навстречу лавине. Это происходит из-за того, что в случае отраженного стримера концентрация свободных электронов в области перед головкой в направлении прорастания стримера значительно выше.



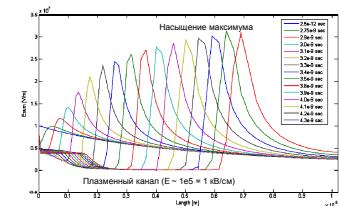
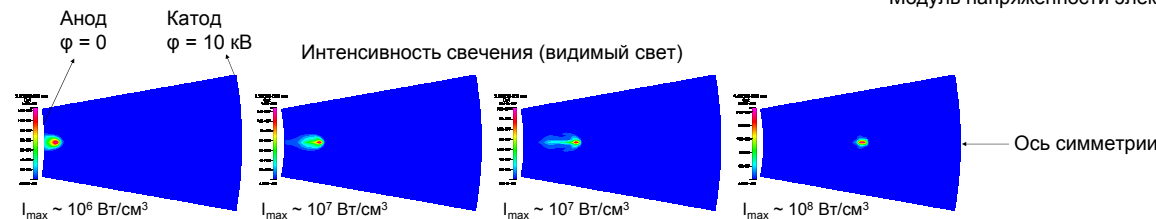
Различие в направлении дрейфа электронов – одна из основных причин отличия формы и динамики развития головок положительного и отрицательного стримеров.

Распределение концентрации электронов в различные моменты времени



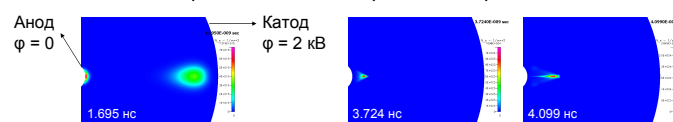
Система электродов: сфера-сфера: R₁ = 1 мм, R₂ = 2.01 мм. Лавина и стример распространяются лишь в узкой области вблизи оси симметрии, и можно рассчитывать сектор круга вместо полного сечения.

Модуль напряженности электрического поля

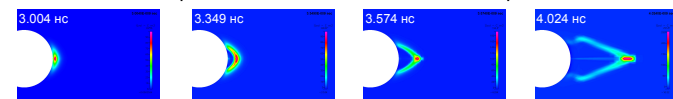


Система электродов: сфера-сфера: R₁ = 50 мкм, R₂ = 0.52 мм.

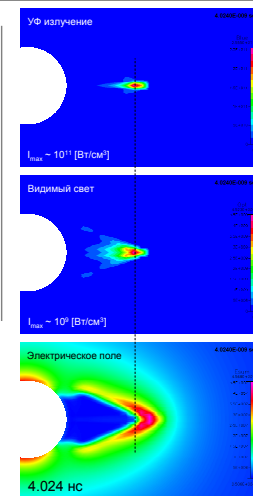
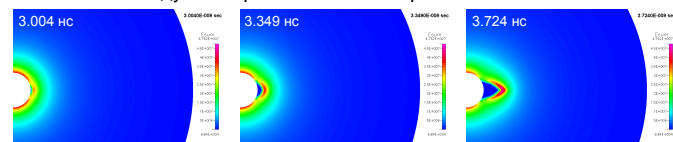
Распределение концентрации электронов



Распределение объемной плотности заряда



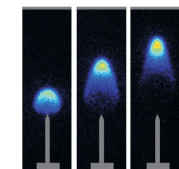
Модуль напряженности электрического поля



Фотографии головки стримера в различные моменты времени можно найти, например, в работе "Streamer head structure: role of ionization and photoionization" авторов M.M. Nudnova и A.Yu. Starikovskii в Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 41, Number 23, 7 December 2008.

Выпуск журнала:
<http://www.iop.org/EJ/toc/0022-3727/41/23>

Статья:
http://www.iop.org/EJ/article/0022-3727/41/23/234003/d8_23_234003.pdf



Фотографии головки стримера в моменты времени 5, 10 и 15 нс после высоковольтного импульса
Время экспозиции: 300 нс.