ОСОБЕННОСТИ ЛАВИННО-СТРИМЕРНОГО ПЕРЕХОДА В ОДНОРОДНОМ И НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.

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

НОЦ «Электрофизика» физического факультета СПбГУ, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, д.3 , 198504, Санкт-Петербург, Россия

stishkov@paloma.spbu.ru

Известно, что при положительном напряжении коронный разряд переходит в стримерную форму [1]. Импульсный пробой при положительной полярности осуществляется по стримерному механизму, поэтому расчет формирования и развития стримеров представляет интерес. Упрощенные одномерные модели не позволяют в полной мере учесть сложные процессы, происходящие в канале и в головке стримера, особенно на начальном этапе развития – вблизи электрода [2].

В работе приведены результаты расчета лавинно-стримерного перехода и начального этапа развития стримеров с учетом кинетического уравнения для электронов в лоренцевом приближении. Искомыми функциями являлись электрический потенциал $\varphi(\mathbf{r},t)$, концентрации ионов, атомов, молекул $n_i(\mathbf{r},t)$ (здесь i обозначает тип частицы), функция распределения электронов по энергиям $f_0(\mathbf{r},E,t)$. Электрическое поле находится из уравнения Пуассона с учетом объемного заряда, образованного ионами и электронами.

$$\Delta\varphi = -\frac{|q_e|}{\varepsilon_0}\left(\sum_i z_i n_i - n_e\right)$$

Здесь z_i – зарядовое число данного сорта частиц.

Концентрации ионов, атомов и молекул находятся из уравнений Нернста-Планка для каждого сорта частиц:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + div\left(z_i n_i \mu_i \vec{E} - D_i \nabla n_i\right) = S_i$$

Здесь μ_i – подвижность разных сортов ионов, D_i – коэффициент диффузии ионов, атомов и молекул. S_i – функция источника, учитывающая гибель и рождение частиц данного сорта в химических реакциях.

Для электронов решается кинетическое уравнение Больцмана в лоренцевом приближении.

$$\begin{cases} V\dfrac{\partial f_0}{\partial t} - \nabla\cdot\left[\chi\left(\nabla f_0 + \nabla\varphi\dfrac{\partial f_0}{\partial E}\right)\right] - \dfrac{\partial}{\partial E}\left[\chi\nabla\varphi\cdot\left(\nabla\varphi\dfrac{\partial f_0}{\partial E} + \nabla f_0\right)\right] = VS_e \\ \chi = \dfrac{V^3}{3\nu} \\ E = \dfrac{m_e V^2}{2q_e} \end{cases}$$

Данные уравнения дополняются алгебраическими соотношениями для скоростей реакций. В модели учтены реакции ионизации электронным ударом, диссоциативного и трехчастичного прилипания, электрон-ионной и ион-ионной рекомбинации, возбуждения молекул электронным ударом.

Решены три задачи для систем электродов с разной степенью неоднородности поля: пара плоских электродов (однородное поле), система электродов сфера-сфера с радиусами 1 мм и 2 мм, а также 0,05 мм и 0,52 мм. Все задачи обладают осевой симметрией. Для систем электродов сфера-сфера моделировался сектор межэлектродного пространства.

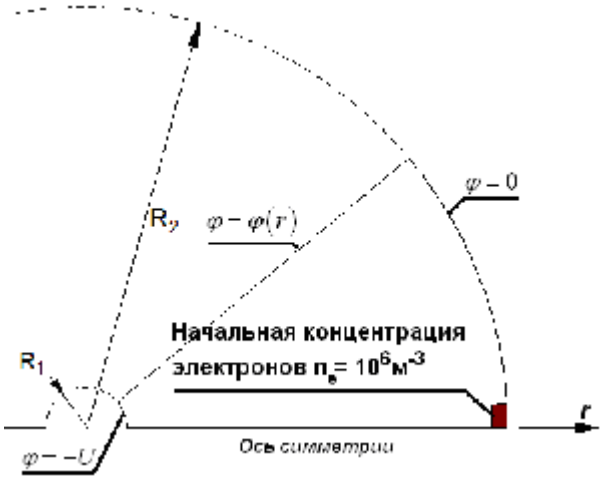


Рисунок 1. Расчетная модель для системы электродов сфера-сфера и граничные условия на потенциал.

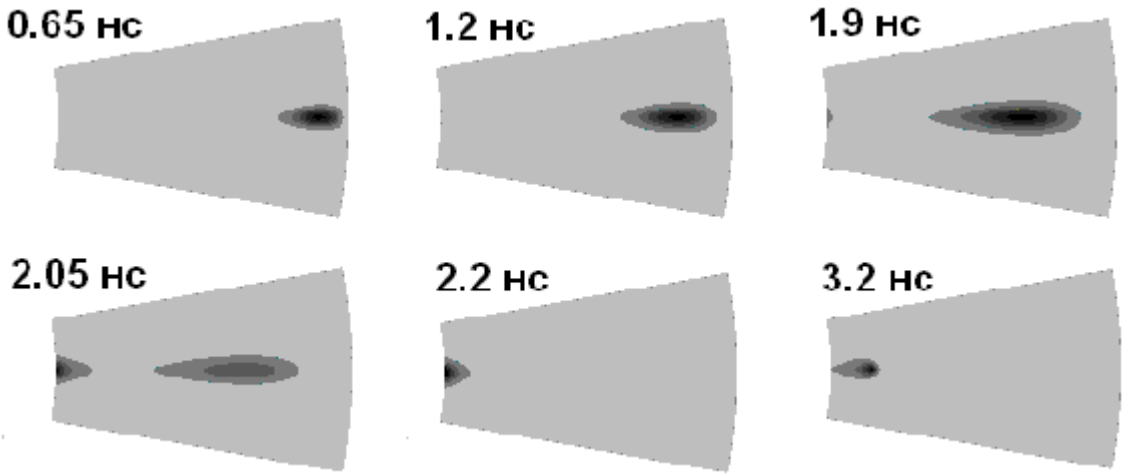


Рисунок 2. Развитие лавины и лавинно-стримерный переход в системе электродов сфера-сфера с радиусом внутренней сферы 1.1 мм. Линии уровня концентрации электронов.

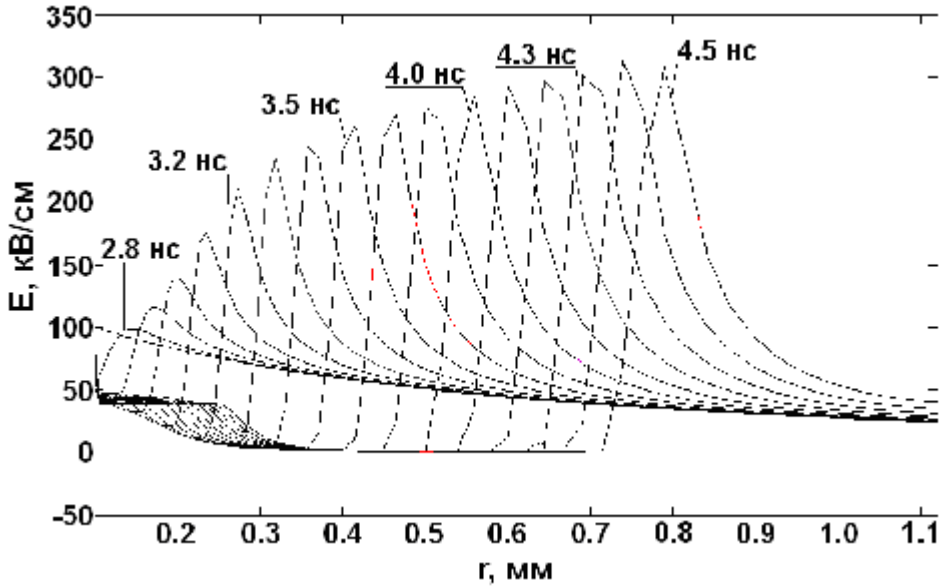


Рисунок 3. Развитие стримера в системе электродов сфера-сфера с радиусом внутренней сферы 1 мм. Напряженность поля на оси симметрии в разные моменты времени.

В качестве начальных условий задавался пакет из 100 электронов в небольшой области вблизи внешнего электрода.

На рисунке 2 приведен начальный этап решения – фаза анодонаправленной лавины, которая характерна тем, что объемный заряд в системе мал и не искажает электрического поля. Лавина движется к

положительному электроду. Форма лавины по мере развития все сильнее отклоняется от классической гауссовой – лавина вытягивается, а затем перед фронтом лавины на границе анода образуется второй локальный максимум электронной концентрации, и направление движения лавины изменяется, на встречное. В момент времени 2,8 нс у границы с анодом образуется электрически квазинейтральная область с высокой концентрацией электронов, напряженность поля в которой значительно уменьшается по сравнению с полем на фронте. Постепенно эта область вытягивается в направлении к катоду и принимает форму канала (момент времени 3,2 нс на рисунке 3). На рисунке 3 приведено изменение напряженности поля на этом и более поздних этапах. К моменту 3,2 нс напряженность поля в канале падает ниже 1 кВ/см, что на два порядка меньше невозмущенного поля – таким образом, канал с этого момента можно считать плазменным. На конце стримерного канала формируется передний фронт – область максимальной напряженности поля (до 300 кВ/см), толщиной около $5 \cdot 10^{-5}$ м, здесь сосредотачивается область ионизации в системе. В канале поле слишком низкое, гибель электронов в результате рекомбинации и прилипания превышает рождение. и образование новых плазменных областей. В результате усиленной ионизации на переднем фронте плазменный канал прорастает от положительного электрода к отрицательному, то есть в направлении, противоположном направлению исходной лавины.

На рисунке 4 приведены распределения напряженности поля в катодонаправленных стримерах. Максимум напряженности приходится на оконечность канала. Область с повышенной напряженностью поля на оконечности канала – передний фронт, за счет ионизации в этой области происходит рост стримера. За фронтом следует полусферическая плазменная головка стримера. Между головкой и положительным электродом находится плазменная область с пониженной напряженностью поля – стримерный канал.

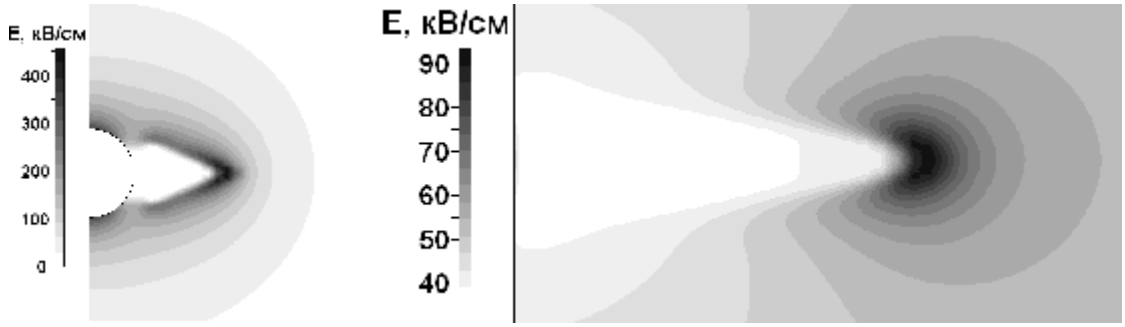


Рисунок 4. Линии уровня напряженности поля. Слева: радиус внутренней сферы 0,05 мм, *t*=40 нс. Справа: плоские электроды, *t*=3,7 нс.

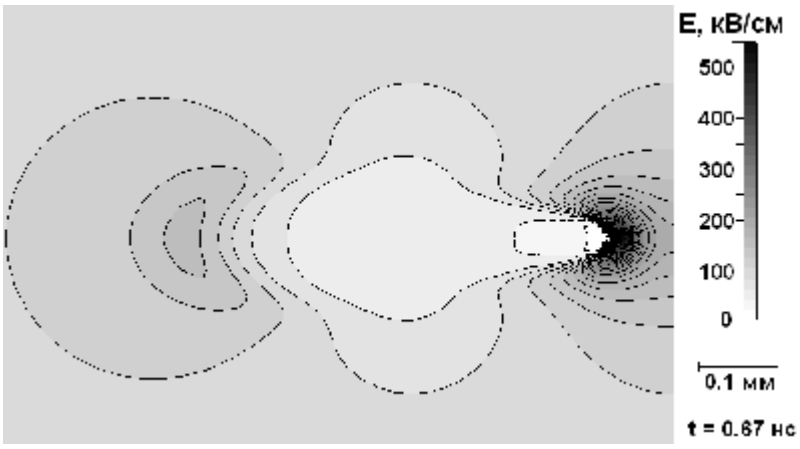


Рисунок 5. Напряженность поля; *t* = 0,67 нс. Плоские электроды.

Характер развития стримера существенно зависит от напряжения. При низком напряжении плазменная область, дающая начало стримерному каналу, непосредственно граничит с положительным электродом. В этом случае образуется катодонаправленный стример (рисунок 4). При напряжении выше определенной величины стример зарождается в межэлектродном промежутке. В этому случае канал имеет две головки – катодонаправленную (положительную) и анодонаправленную (отрицательную), и из первоначального плазменного образования стример прорастает в обе стороны (рисунок 5).

Решение выявило существенные различия в развитии отрицательной и положительной головок стримера. Радиус положительной головки со временем уменьшается, отрицательной – растет. Напряженность поля на фронте отрицательной головки меньше, чем на фронте положительной, а

толщина фронта у отрицательной головки больше (рисунок 5). Решение позволило рассчитать распределение мощности излучения, а также импульсы тока в цепи источника напряжения.

Литература:

1. С.Б.Афанасьев, Д.С.Лавренюк, И.Н.Петрушенко, Ю.К.Стишков, Некоторые особенности коронного разряда в воздухе // Журнал технической физики, 2008, том 78, вып. 7.

2. Базелян, Э.М. Искровой разряд. Учебное пособие: Для вузов / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер – М.: Изд-во МФТИ, 1997. – 320 с.