

03;04

О распределении электрического поля у края электрода при поверхностном разряде

© С.А. Кривов, В.С. Ларин, М.В. Соколова, Л.Л. Черненский,
М.А. Егорова

Московский энергетический институт (ТУ)
E-mail: KrivovSA@mpei.ru

Поступило в Редакцию 28 мая 2009 г.

Приводятся результаты расчета распределения электрического поля, созданного краем электрода в газе вблизи диэлектрической поверхности. Программа расчета основана на методике конечных элементов и учитывает поле электрических зарядов, которые оседают на поверхность барьера при развитии поверхностного разряда с края электрода под действием высокого напряжения. Целью работы является объяснение экспериментальных результатов, изложенных в [1] и показывающих, что канал поверхностного микроразряда располагается на расстоянии 0.6–1.5 mm над поверхностью барьера. Расчетами показано, что положение канала микроразряда по отношению к поверхности барьера зависит от плотности зарядов, оседающих на поверхность барьера при разряде, и от характера их распределения.

Приводимые в литературе (например, [2,3]) экспериментальные данные показывают, что поверхностный разряд на начальных этапах своего развития состоит из множества микроразрядов, возникающих у края электрода, расположенного на поверхности диэлектрической пластины, и имеющих канальную (стримерную) структуру. Конфигурация приложенного электрического поля у края электрода зависит от электродной системы. Для электродной системы, рассмотренной в [1,2] и представленной на рис. 1, а, преобладает нормальная составляющая поля. Считалось (например, в [4]), что в такой электродной системе разряд после своего появления развивается непосредственно вдоль поверхности барьера, что обусловлено действием нормальной составляющей поля и поля зарядов поляризации. Однако описанные в [1] эксперименты показывают, что каналы стримеров микроразрядов в рассматриваемой электродной системе расположены на некотором

расстоянии от поверхности диэлектрической пластины, причем значение этого удаления в условиях эксперимента [1] для напряжения 2.5 kV составляет 0.6–1.5 mm. Такое поведение каналов микроразрядов невозможно объяснить, исходя только из картины электростатического поля. Было сделано предположение, что наблюдаемое поведение стримерных каналов обусловлено влиянием зарядов, оседающих на поверхность барьера во время развития разрядных процессов еще до формирования стримерного канала. Целью данной работы было проанализировать возможность развития канала микроразряда на расстоянии от поверхности барьера. Предложена модель развития стримера вблизи диэлектрической поверхности. В модели расчет электрического поля у края электрода ведется с учетом поля зарядов, оседающих на поверхность барьера при ионизационных процессах в прилегающем к барьеру газовом слое. В работе не рассматриваются конкретные процессы взаимодействия оседающих зарядов с диэлектрической поверхностью. Считается, что осевшие заряды сохраняются на поверхности в течение всего рассматриваемого полупериода приложенного переменного напряжения, при этом возможность возникновения обратного разряда не анализируется.

В работе использована программа расчета электрического поля BETAFields [5], основанная на методике конечных элементов и ориентированная на двумерное представление электродной системы, использованной в экспериментах [1] (рис. 1, *a*). Тонкий электрод (полоса алюминиевой фольги толщиной 30 μm) располагается на поверхности диэлектрической пластины из керамики (в дальнейшем именуемой барьером), имеющей толщину 1.2 mm. Второй электрод расположен на обратной стороне пластины. Край электрода, у которого возникает поверхностный разряд, имеет радиус закругления 15 μm . Начальные и граничные условия, используемые в программе, соответствуют уравнению Пуассона, а алгоритм расчета основывается на известных физических представлениях о процессах развития поверхностного разряда и учитывает ряд изложенных ниже моментов.

При повышении приложенного напряжения до появления разрядных процессов электрическое поле у края электрода создается высоким потенциалом электрода и полем зарядов поляризации материала барьера. Поле зарядов поляризации противоположно внешнему полю, создаваемому электродом. Когда в газе у края электрода под действием большой напряженности поля начинаются процессы ионизации, заряды

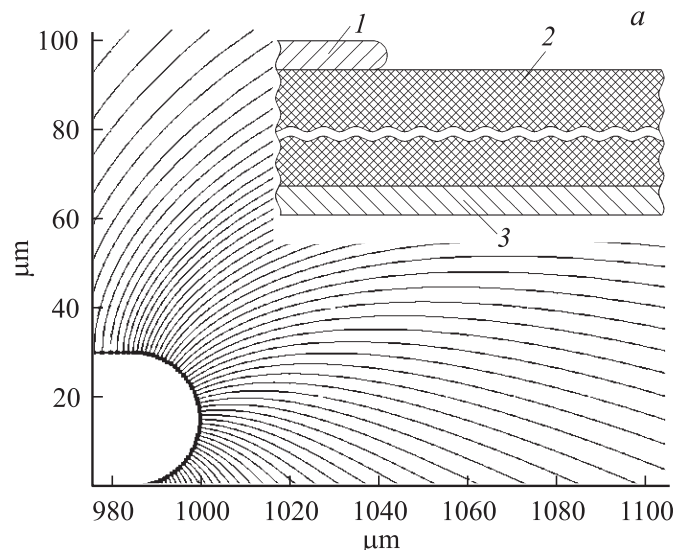


Рис. 1. Распределение электростатического поля в газе у края электрода, расположенного на поверхности диэлектрического барьера. Приложенное напряжение 2.5 kV. *a* — электродная система и распределение силовых линий электростатического поля у края электрода: 1 — электрод, с которого развивается разряд, $\delta = 30 \mu\text{m}$; 2 — диэлектрический барьер, $\delta = 1.2 \mu\text{m}$; 3 — второй электрод, $\delta = 30 \mu\text{m}$. *b* — силовые линии электростатического поля у края электрода для комбинированного барьера с покрытием толщиной $15 \mu\text{m}$.

первых лавин (положительные ионы или электроны) должны двигаться по силовым линиям электрического поля и оседать на поверхность барьера, притягиваясь к зарядам поляризации. В результате поверхность барьера в области у края электрода заряжается. Это означает, что заряды последующих лавин не смогут двигаться по направлению к поверхности барьера, а будут перемещаться по новым силовым линиям суммарного поля у электрода, т.е. на некотором расстоянии от поверхности барьера. В итоге основное направление для развития канала разряда будет не к поверхности барьера по первоначальным силовым линиям электростатического поля, а все более отдаляясь от нее из-за осевших зарядов.

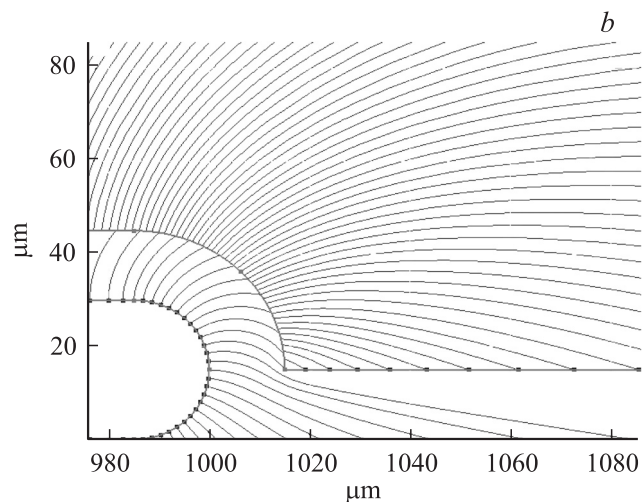


Рис. 1 (продолжение).

Для образования канала стримера при развитии поверхностных ионизационных процессов необходимо выполнение условия Таунсенда

$$\int_0^L \alpha_{eff} dx = K,$$

где α_{eff} есть эффективный первый коэффициент Таунсенда, учитывающий как ионизацию, так и потерю электронов за счет их прилипания к атомам и молекулам с образованием отрицательных ионов. Значение величины K определяется процессами вторичной ионизации на катоде, который в нашем случае представлен поверхностью барьера, а L в данных условиях есть путь вдоль силовой линии, передвигаясь по которому лавина может развиваться, пока напряженность поля достаточна для ионизации.

Алгоритм расчета включает несколько последовательных итераций. В качестве первой итерации рассчитывается электростатическое поле у края электрода, учитывающее как поле электрода, так и поле поляризованных зарядов у поверхности барьера без учета зарядов, оседающих

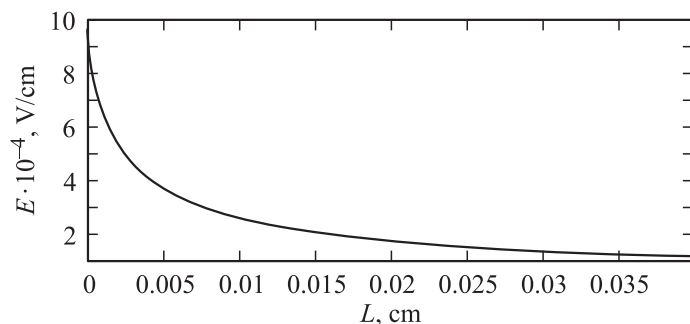


Рис. 2. Распределение значений напряженности электростатического поля по длине L произвольно выбранной силовой линии.

на поверхность барьера. Область вокруг края электрода разбивается на малые треугольные элементы и строятся силовые линии поля, как показано на рис. 1, *a*. На рис. 2 показано изменение напряженности поля вдоль одной из силовых линий, изображенных на рис. 1, *a*.

Вторым шагом расчетного алгоритма является оценка количества зарядов, образованных лавинами, которые возникают и развиваются по тем силовым линиям, где поле достаточно для прохождения ионизационных процессов. Во всех расчетах условия соответствуют эксперименту [1]. Все размеры представлены на рис. 1, *a*, диэлектрическая постоянная материала барьера (керамика 22ХС на базе Al_2O_3) равна $\epsilon = 9$, приложенное к электроду напряжение $U = 2.5 \text{ kV}$. Число зарядов, образующихся при развитии лавины на длине x , $n = n_0(\exp \alpha_{eff})$. Значения $\alpha_{eff} = f(E)$ берутся из [4] и учитывают возможное влияние диэлектрической поверхности, вдоль которой развивается разряд в системе электродов, аналогичной используемой в нашей работе. Значение n_0 взято равным 10^3 . В соответствии с критерием Таунсенда стример может образоваться, если число зарядов, созданных лавиной, $n \geq 10^8$, поэтому длина силовой линии L , по которой развивается лавина, должна обеспечить создание указанного числа зарядов.

Следующая итерация состоит в учете в расчетах электрического поля зарядов на поверхности барьера. Для включения в программу расчета поля зарядов необходимо знать распределение этих зарядов по поверхности барьера. Была предложена следующая процедура расчета и учета осевших зарядов. Рассчитывается количество зарядов, создава-

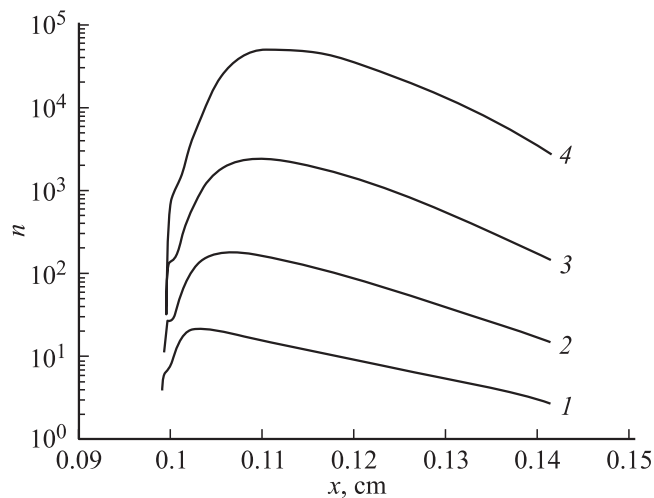


Рис. 3. Распределение по поверхности барьера числа электронов n , оседающих на поверхность при разных значениях приложенного напряжения: 1 — 1.5 кВ; 2 — 2 кВ; 3 — 2.5 кВ; 4 — 3 кВ.

емых лавинами, равньюющимися вдоль всех силовых линий, которые доходят до поверхности барьера на расстояниях не более 3 мм от кончика электрода. Строится распределение заряда, созданного каждой лавиной и оседающего на поверхность барьера, в функции места расположения на поверхности барьера выбранной силовой линии. На рис. 3 представлены кривые распределения заряда при разных значениях приложенного напряжения. Характер распределения определяется различием условий, в которых развиваются лавины: силовые линии, где напряженность поля максимальна, имеют малую длину, на которой лавина не успевает создать большой заряд. Силовые линии большей длины соответствуют меньшим напряженностям поля.

Следующие итерации позволяют рассчитать поле с учетом зарядов, уже осевших на поверхность барьера, и заряды лавин, образующихся в новых условиях. Расчет ведется до тех пор, пока не будет определена лавина, в которой заряд равен или превышает критический заряд, необходимый для перехода лавины в стример по критерию Таунсенда. На рис. 4 представлена картина электрического поля, определенная

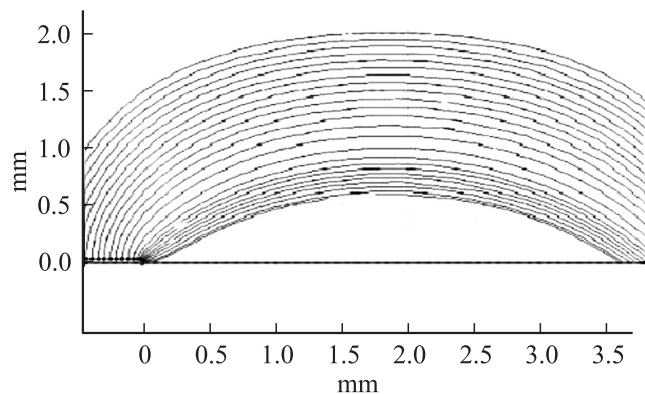


Рис. 4. Распределение силовых линий поля у края электрода, развиваясь по которой лавина может создать число электронов $n \geq 10^8$.

с учетом поля зарядов, оседающих на поверхность барьера. Расчет показывает, что ближайшая к барьеру силовая линия, развиваясь по которой лавина может создать критический заряд, лежит на расстоянии порядка 0.6 mm от поверхности барьера.

Таким образом, результаты, полученные расчетом, согласуются с экспериментальными данными, описанными в [1]. Это позволяет заключить, что предложенная модель развития стримерного канала микроразряда, учитывающая влияние на электрическое поле осевших на поверхность барьера зарядов, не противоречит эксперименту и позволяет объяснить механизм развития микроразряда на расстоянии от поверхности барьера.

Аналогичным образом были проведены расчеты для случая, когда поверхность барьера вместе с электродом покрыта тонким слоем другого твердого диэлектрика толщиной $15 \mu\text{m}$, имеющего $\epsilon = 6$ (комбинированный барьер), что существенно увеличивает эквивалентный радиус закругления края электрода и ведет к снижению напряженности поля у края при заданном напряжении. Расчет по описанной выше методике показал, что для обеспечения условий возникновения стримера необходимо увеличение приложенного напряжения, что наблюдается и в экспериментах. Для рассматриваемых условий расчетом установлено, что образование первых стримеров в примыкающем к барьеру газовом слое возможно при напряжении, превышающем 3.1 kV. Распределение

силовых линий для указанного случая представлено на рис. 1, *b*. Расчеты показали, что и для комбинированного барьера канал микроразряда располагается на удалении от поверхности, значение которого зависит от материала и структуры поверхностного слоя барьера.

Работа проведена по заданию Минобразования РФ, выполняемому по проекту № 2.1.2/6243 в рамках аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)“.

Список литературы

- [1] Sokolova M.V., Kozlov K.V., Krivov S.A., Samoiloich V.G., Tatarenko P.A. // JTPH Letters. 2009. V. 35. N 5. P. 22–28.
- [2] Kozlov M.V., Sokolova M.V., Temnikov A.G., Timatkov V.V., Vereshchagin I.P. // Plasma and Polymers. 2003. V. 8. 179–197.
- [3] Sokolova M., Hulka L., Pietsch G. // Plasma Processes and Polymers. 2005. V. 2. P. 162–169.
- [4] Gallimberti I., Badakoni S., Nimeyer L. // Proc. of VII Int. Symp. on High Voltage Engineering. Dresden, 1991. P. 47.
- [5] Программа расчета двумерных электрических полей методом конечных элементов BETAFields. Руководство пользователя. <http://www.facts-plus.com/BETAFields.2006>.