

04;11

Влияние структуры поверхности твердого диэлектрика на электрическое поле вблизи границы раздела воздух—барьер

© А.Н. Митин, М.В. Соколова

НИУ Московский энергетический институт, Москва

E-mail: mitin_aleksei@inbox.ru

Поступило в Редакцию 29 декабря 2011 г.

Представлены результаты расчета распределения электрического поля в воздухе вблизи поверхности твердого диэлектрика с разной степенью шероховатости его поверхности. Предложена расчетная модель, с использованием которой на примере ситалла показано, что электрическое поле вблизи вершин выступов на поверхности твердого диэлектрика может в 2.5–3.5 раза (в зависимости от степени шероховатости) превышать напряженность поля в воздушном промежутке. При этом определено, что поле во впадинах в 10 раз слабее поля у вершин выступов. Полученный результат согласуется с экспериментально установленным в [1] изменением интенсивности разрядных процессов у поверхности при увеличении шероховатости твердого диэлектрика.

Анализ условий развития электрического разряда в газовом промежутке, в котором есть граница раздела „газ—твердый диэлектрик“, требует знания характеристик твердого диэлектрика, которые могут определять ионизационные процессы в газовой части промежутка между электродами. При исследовании поверхностных разрядов в воздухе при воздействии переменного напряжения (например, в [1]) в электродной системе, в которой один электрод находится на одной стороне диэлектрической пластины (барьера), а второй — на ее обратной стороне, было выявлено влияние на интенсивность поверхностного разряда состояния поверхности твердого диэлектрика. При рассмотрении поверхностного разряда по пластинам ситалла с разной степенью шероховатости поверхности установлено, что при использовании пластин с более шероховатой поверхностью наблюдается удлинение каналов микрозаряда, рост их числа и интенсивности их ветвления по сравнению с разрядом по гладкой поверхности того же твердого диэлектрика. В [1] высказано предположение о том, что одной

из возможных причин влияния поверхности твердого диэлектрика на разряд является зависимость от структуры поверхности коэффициента вторичной ионизации, определяемого эмиссией электронов, зависящей от многих факторов, в том числе и от напряженности электрического поля. В [2] показано, что механическая обработка поверхности диэлектрика в большинстве случаев увеличивает эмиссию электронов с поверхности, так как образуется много дефектов в кристаллической решетке, что приводит в конечном итоге к более интенсивному разряду.

Для анализа влияния структуры поверхностного слоя диэлектрической пластины на разрядные процессы в прилегающей газовой части промежутка в данной работе проведено определение характера изменения распределения электрического поля вблизи границы воздух–диэлектрик при изменении структуры поверхности твердого диэлектрика.

В [3] для электродной системы, в которой электроды расположены на противоположных сторонах пластины твердого диэлектрика (барьера) с гладкой поверхностью, проведены расчеты распределения напряженности электрического поля у края электрода и ее изменения по силовой линии, вдоль которой возможно образование канала поверхностного микроразряда. Расчетами показано, что у края электрода вблизи поверхности твердого диэлектрика нормальная составляющая напряженности поля в газе существенно превышает тангенциальную составляющую. Это позволяет в данной работе в качестве приближения использовать расчетную модель, в которой твердый диэлектрик и воздушный промежуток у его поверхности заключены между плоскими электродами с расстоянием между ними, указанными на рис. 1, *a*. В такой модели имеет место только нормальная составляющая напряженности поля.

Расчет напряженности электрического поля по предложенной модели проводится с использованием программы BETAFields [4], предназначенной для расчетов электрических полей в плоских и аксиально-симметричных электродных системах методом конечных элементов.

Для проведения расчетов по выбранной модели в качестве твердого диэлектрика выбран ситалл, достаточно широко применяющийся в радиотехнической промышленности и имеющий относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 9$. В данной работе рассматриваются пластины ситалла с разными параметрами шероховатости R_a (средним значением перепада высот между впадиной и выступом на поверхности)

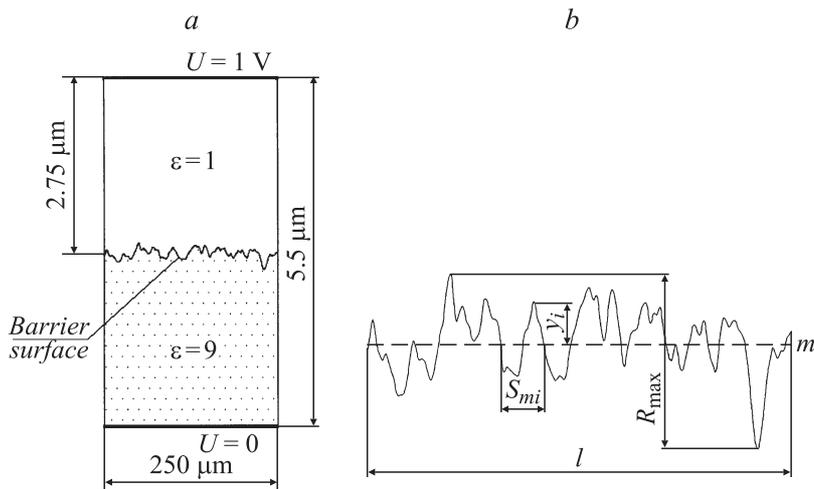


Рис. 1. *a* — расчетная модель и граничные условия, *b* — параметры шероховатости поверхности твердого диэлектрика: R_{\max} — наибольшая высота профиля, S_m — средний шаг неровностей профиля.

и разным значением S_{mi} , т.е. средним шагом неровностей профиля (рис. 1, *b*). Параметр R_a определен как среднеарифметическое отклонение профиля на длине $l = 250 \mu\text{m}$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i. \quad (1)$$

Значения y_i получены с помощью сканирующего оптического микроскопа OLYMPUS LEXT OLS3100. Характеристики шероховатости моделируемых поверхностей приведены в таблице. Более гладкая поверхность ситалла отличается в 5 раз меньшей высотой выступов и в 2–3 раза меньшим расстоянием между выступами.

При выборе эскиза электродной системы в данной модели геометрические размеры подобраны таким образом, что расстояние между электродами по крайней мере в 10 раз превышает наибольшую высоту профиля R_{\max} . Это необходимо для того, чтобы шероховатость поверхности не оказывала влияния на распределение электрического поля во

Характеристики поверхности пластин из ситалла

Тип поверхности	$R_{\max}, \mu\text{m}$	$R_a, \mu\text{m}$	$S_{mi}, \mu\text{m}$
Шероховатая	0.685	0.349	9.38
Гладкая	0.117	0.056	5.38

всем промежутке между электродами, которое в данной постановке задачи является однородным. Ширина моделируемой области принята равной $250 \mu\text{m}$. Форма границы раздела воздух–твердый диэлектрик построена на основании полученных авторами экспериментальных данных, характеризующих структуру пластин ситалла, описанных выше.

Для расчетов по выбранной модели использовались следующие граничные условия. Потенциал верхнего электрода принят равным 1 V , потенциал нижнего электрода равен 0 . Правая и левая границы моделируемой области в данной задаче представляются диэлектриком (воздух и твердый диэлектрик) с учетом нулевых граничных условий второго рода. Граница раздела газ–твердый диэлектрик располагается посередине между электродами, полное расстояние между которыми взято равным $5.5 \mu\text{m}$ (рис. 1, *a*). Значение напряженности в воздушной части промежутка вдали от поверхности твердого диэлектрика с выступами E_{gas} определяется размерами модели и диэлектрическими проницаемостями ϵ_d и ϵ_{gas} , соответствующими твердому диэлектрику и воздуху, и для указанных на рис. 1, *a* параметров составляет $2.8 \cdot 10^3 \text{ V/m}$.

При решении рассматриваемой задачи использован адаптивный метод вычислений, обеспечивающий погрешность вычислений не более 5% .

Полученные расчетом картины распределения напряженности электрического поля вблизи выступов на поверхности диэлектрика с разной степенью шероховатости представлены на рис. 2, *a, b*, на котором светлые области соответствуют зонам с большей напряженностью электрического поля. Расчеты показывают, что усиление поля локализовано и имеет место лишь в небольшой области вблизи выступов на поверхности барьера. При этом распределение напряженности в каждой области определено с учетом всех остальных выступов.

Максимальная напряженность поля у поверхности каждого выступа E_{\max} определяется его высотой, т. е. значением H_i и увеличивается практически пропорционально с увеличением H_i . Для шероховатой поверх-

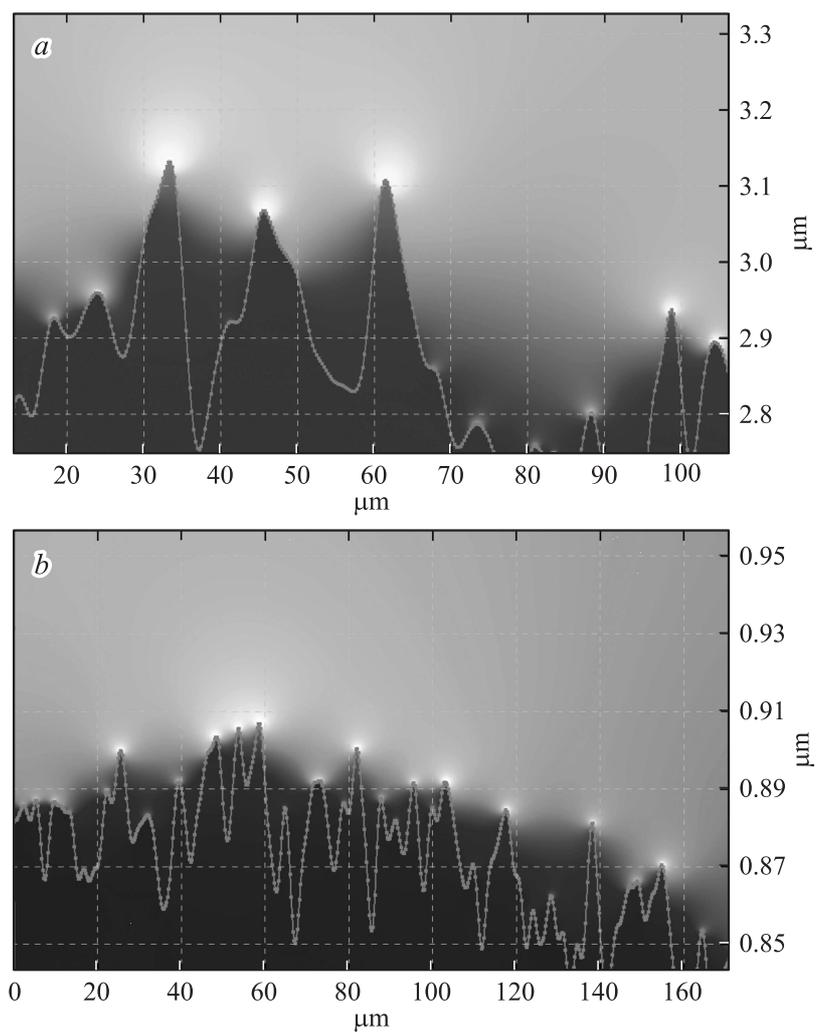


Рис. 2. Распределение электрического поля вблизи поверхности твердого диэлектрика: *a* — шероховатая поверхность, *b* — гладкая поверхность.

ности значение максимальной напряженности E^* , нормированное на значение $E_{gas} = 2.8 \cdot 10^3 \text{ V/m}$, $E^* = E_{max}/E_{gas}$, составляет от $E^* = 1.5$ для минимальной измеренной высоты выступа $0.08 \mu\text{m}$ до $E^* = 3.5$ для максимальной шероховатости $R_{max} = 0.26 \mu\text{m}$. Соответствующие значения для гладкой поверхности ситалла составляют от 1.2 для минимальной высоты выступа $0.0075 \mu\text{m}$ до 2.3 для $R_{max} = 0.048 \text{ nm}$.

Область повышенной напряженности распространяется в глубь воздушной части промежутка на расстояние d от поверхности выступа (перпендикулярно поверхности твердого диэлектрика), соизмеримое со значением R_a . Спад значений напряженности E^* с ростом d в области усиления поля у выступа носит экспоненциальный характер. Для шероховатой поверхности максимальное расстояние, на которое распространяется усиление поля, составляет $0.270 \mu\text{m}$, для гладкой — $0.05 \mu\text{m}$.

Влияние соседних выступов на распределение напряженности поля (влияние шага неровностей профиля) у отдельно взятого выступа оценено расчетом, проведенным для поверхностей с одинаковыми значениями параметров R_a и R_{max} и разных значений S_{mi} . Установлено, что уменьшение расстояния между выступами в 8 раз (с 9.5 до $1.2 \mu\text{m}$) не меняет усиления поля и характера его распределения у вершины выступа. Полученный результат является чисто теоретической оценкой, так как по экспериментально определенному профилю поверхности столь малых значений S_{mi} (до $1.2 \mu\text{m}$) определено не было. Дополнительно следует отметить, что во всех случаях расчетная напряженность поля E_{max} во впадинах между выступами почти в 10 раз меньше, чем у вершин выступов.

Расчетами, проведенными в [3] без учета профиля поверхности твердого диэлектрика, показано, что значение напряженности поля в воздухе в области края электрода на расстоянии $1.5\text{--}2 \text{ mm}$ от поверхности твердого диэлектрика может достигать $E_{gas} = 5 \cdot 10^6 \text{ V/m}$. Это значение относится к воздушной части промежутка, где влияния структуры поверхности уже нет, и может быть использовано для оценки максимальной напряженности у поверхности выступа. Для гладкой поверхности, для которой расчетное максимальное значение $E^* = 2.6$, максимальная напряженность может достичь значения $1.25 \cdot 10^7 \text{ V/m}$, для шероховатой поверхности, для которой $E^* = 3.5$, максимальная напряженность может составить $1.75 \cdot 10^7 \text{ V/m}$. Различием этих значений можно объяснить полученное экспериментально в [1] различие характеристик поверхностного разряда по диэлектрическим пластинам с разной

поверхностной структурой, которое выражено в большей интенсивности разрядных процессов у поверхности твердого диэлектрика с большей шероховатостью.

Таким образом, в работе с помощью программы BETAFields установлено:

1. Увеличение шероховатости поверхности твердого диэлектрика ведет к усилению электрического поля вблизи выступов на поверхности. Для параметра шероховатости $R_a = 0.26 \mu\text{m}$ поле у кончика выступа может в 3.5 раза превысить поле в воздухе вдали от поверхности. Максимальное усиление поля у выступов на гладкой поверхности составляет 2.6.

2. Влияние выступов на распределение поля распространяется в глубь промежутка на расстояние, не превышающее значения шероховатости поверхности.

3. Во всех случаях напряженность поля во впадине между выступами более чем в 10 раз меньше напряженности поля у кончика выступов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 2.1.2/13478 в рамках АВЦП „Развитие научного потенциала высшей школы“ (2009–2011 гг.)).

Список литературы

- [1] Sokolova M., Hulka L., Pietsch G. // Plasma Processes and Polymers. 2005. V. 2. P. 162–169.
- [2] Allegraud R., Leick N., Guaitella O., Rousseau A. // Book of Contributed Papers of 11th International Symposium on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry Nakone XI. Oleron Island, France, 2008. P. 60–64.
- [3] Кривов С.А., Ларин В.С., Соколова М.В., Черненко Л.Л., Егорова М.А. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 3. С. 68–75. (Krivov S.A., Larin V.S., Sokolova M.V., Chernensky L.L., Egorova M.A. // Technical Phys. Lett. 2010. V. 36. N 2. P. 126–129.)
- [4] <http://facts-plus.com/BETAFields>. Разработчик В.С. Ларин.