

УДК 621.382

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Тявловский А.К.¹, Жарин А.Л.¹, Гусев О.К.¹, Тявловский К.Л.¹, Мухуров Н.И.², Опеляк М.³

¹Белорусский национальный технический университет,

²Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

³Люблинский технический университет, Люблин, Польша

Сканирующие измерения пространственного распределения потенциала поверхности диэлектриков отличаются от измерений пространственного распределения контактной разности потенциалов проводящих поверхностей не только большей величиной регистрируемых потенциалов, но и характером их распределения, что подтверждается результатами теоретического моделирования и экспериментальных исследований. Заряд дефекта поверхности диэлектрика, как правило, не сосредоточен в одной точке пространства, а нормально распределен в некоторой окрестности дефекта, т. е. не является локальным. Площадь распределения заряда при этом значительно превышает площадь чувствительной поверхности электрометрического зонда, что делает применение ранее разработанной модели для зонда конечных ненулевых размеров и набора точечных дефектов [1] некорректным для данного случая. Напротив, при моделировании методики измерений пространственного распределения потенциала поверхности диэлектрических материалов электрометрический зонд следует рассматривать как точечный объект, а заряд дефекта на поверхности диэлектрика – как распределенный.

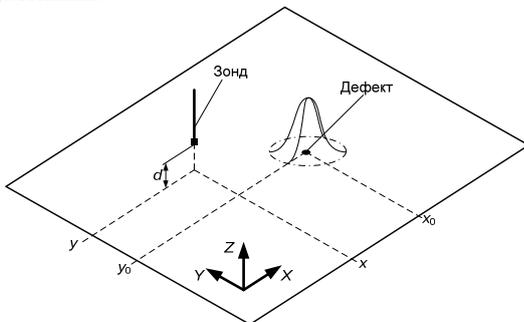


Рисунок 1 – Схема измерений пространственного распределения потенциала поверхности диэлектрических материалов сканирующим электрометрическим зондом

В большинстве практических случаев распределение заряда в окрестности дефекта на поверхности диэлектрика близко к нормальному. Это позволяет описать данное распределение двумерным законом Гаусса:

$$q(x_1, y_1) = \frac{q_0}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{(x_1-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y_1-y_0)^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (1)$$

где q_0 – максимальное значение заряда на дефекте; x_0, y_0 – математическое ожидание (коор-

динаты центра) местоположения дефекта; σ_x, σ_y – средние квадратические отклонения по координатным осям X и Y, соответственно.

Электрометрический зонд в процессе измерений в режиме сканирования перемещается по координатам X и Y на некотором расстоянии d от поверхности образца, составляющем зазор зонд-образец (рисунок 1). В процессе сканирования расстояние l между зондом, находящимся в точке (x, y) и зарядом, находящимся в точке (x_1, y_1) изменяется по закону

$$l(x, y) = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}. \quad (2)$$

Заряд $q(x_1, y_1)$, расположенный на расстоянии l от зонда, наводит на поверхности последнего заряд противоположного знака. Плотность данного наведенного заряда может быть определена по правилу изображений [2] как

$$\rho(x, y, x_1, y_1) = -\frac{q(x_1, y_1)d}{2\pi(l^2(x, y) + d^2)^{3/2}}, \quad (3)$$

Полную плотность наведенного на чувствительной поверхности зонда заряда, с учетом распределенного характера заряда дефекта, можно рассчитать путем интегрирования как

$$\Theta(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x, y, x_1, y_1) dx_1 dy_1. \quad (4)$$

где q_0 – максимальное значение заряда на дефекте; x_0, y_0 – математическое ожидание (координаты центра) местоположения дефекта; σ_x, σ_y – средние квадратические отклонения по координатным осям X и Y, соответственно.

Регистрируемое значение электрического потенциала поверхности диэлектрика при этом составит

$$U_{CPD}(x, y) = \frac{\Theta(x, y)S_{probe}}{C_{probe}}, \quad (5)$$

где S_{probe} – площадь чувствительной поверхности зонда; C_{probe} – электрическая емкость зонда относительно поверхности образца.

Для численного моделирования использовалась программная среда (САМ-система) MathCad 14. Для упрощения вычислений центр координат был совмещен с центром распределения заряда (местом расположения моделируемого дефекта). Моделировались два наиболее типичных для реальных поверхностей случая:

1) Осесимметричное распределение заряда дефекта ($\sigma_x = \sigma_y$).

2) Вытянутое (протяженное) эллиптическое распределение с соотношением полуосей $\sigma_x:\sigma_y = 1:3$.

Целью моделирования являлся поиск оптимального соотношения зазора зонд-образец и шага двухкоординатного сканирования, обеспечивающего максимальную достоверность измерений (т. е. соответствие регистрируемого распределения сигнала электрометрического зонда в процессе сканирования реальному распределению потенциала поверхности диэлектрических материалов). Для этого численно моделировалось перемещение зонда над поверхностью образца с малым шагом ($\Delta x = \Delta y = 0,01\sigma_x$) с различными установками зазора зонд-образец в пределах от $0,1\sigma_x$ до $3\sigma_x$. Результаты моделирования представлялись в виде трехмерных графиков пространственного распределения сигнала электрометрического зонда в процессе сканирования (рисунки 2 и 3).

Видно, что при малых (относительно размеров дефекта) размерах электрометрического зонда величина зазора зонд-образец в пределах $0,3\sigma_x \dots 3\sigma_x$ не оказывает существенного влияния на пространственное разрешение сканирования, поскольку границы распределения регистрируемых значений потенциала в целом совпадают с границами распределения заряда. Следует отметить, что при установке в модели минимальной величины зазора $d = 0,1\sigma_x$ распределение сигнала принимает практически равномерный характер без четко выраженных границ, что является неприемлемым с точки зрения методики измерений. Увеличение зазора с $d = 0,3\sigma_x$ до $d = 3\sigma_x$ приводит к более острому распределению регистрируемых значений потенциала, при этом интенсивность максимума сигнала падает приблизительно в 3 раза на этом диапазоне значений зазора (с 0,9 В до 0,33 В).

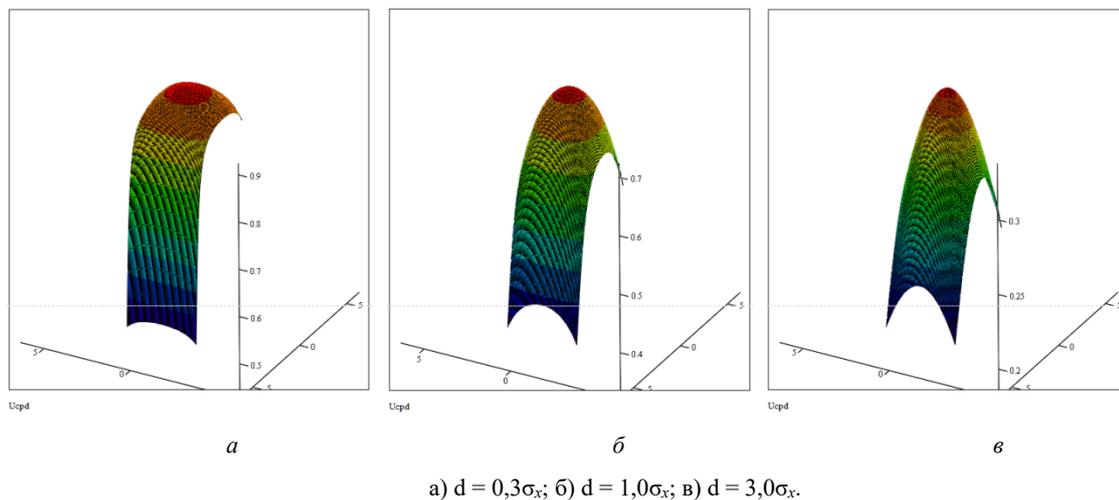


Рисунок 2 – Результат моделирования отклика электрометрического зонда при сканировании поверхности диэлектрика с осесимметричным дефектом

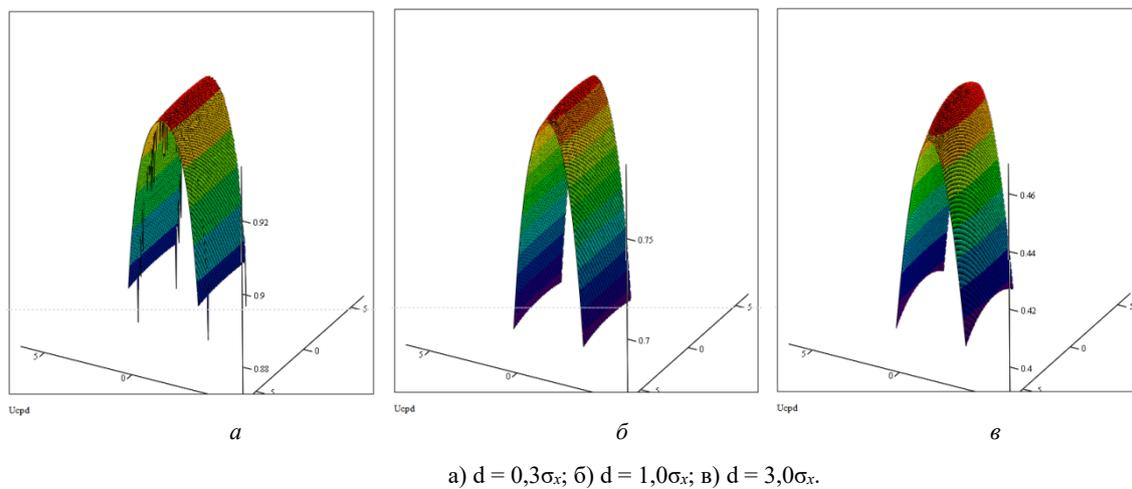


Рисунок 3 – Результат моделирования отклика электрометрического зонда при сканировании поверхности диэлектрика с дефектом вытянутой формы