

НЕРАЗРУШАЮЩЕЕ ВЫЯВЛЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСКОНТАКТНОГО СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДА КЕЛЬВИНА

Тявловский А.К., Пантелеев К.В., Жарин А.Л., Гусев О.К., Воробей Р.И.,
Тявловский К.Л., Свистун А.И.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
nil_pt@bntu.by

В работе проведены исследования по оценке возможности обнаружения единичных дефектов, включая зоны концентрации механических напряжений, линейные и точечные дефекты поверхности, и погрешности локализации выявляемых дефектов материалов зондом Кельвина заданных геометрических размеров. Выполнены экспериментальные исследования потенциального рельефа диэлектрических образцов с искусственно созданным единичным дефектом.

Математическое моделирование. Теоретический анализ взаимодействия единичного дефектов с чувствительным элементом электрометрического зонда (зондом Кельвина [1]) выполнялся на основе компьютерного моделирования средствами Mathcad. В основу исследований положен подход, заключающийся в представлении единичного дефекта ассоциированным с ним избыточным электрическим зарядом и использовании метода отражений для расчета регистрируемых значений контактной разности потенциалов (КРП) [2, 3]. Распределение электрического заряда в дефекте, размеры которого много меньше размеров зонда, моделируется дельта-функцией. При реализации традиционного метода измерения КРП с полной компенсацией [4] электрический потенциал зонда равен усредненному потенциалу поверхности в проекции чувствительного элемента на поверхность. Система «зонд-образец в целом электронейтральна, и, таким образом, ее суммарный заряд равен нулю. Цепь обратной связи, обеспечивающая равенство потенциалов зонда и поверхности, в рассматриваемой схеме отсутствует. Чувствительный элемент при этом условии рассматривается как изолированная проводящая пластина, расположенная на расстоянии d от исследуемой поверхности, причем данное расстояние является функцией от времени (динамический конденсатор)

$$d(t) = d_0 + d_1 \sin \omega t = d_0(1 + m \sin \omega t),$$

где d_0 – зазор «зонд-образец»; d_1 – амплитуда вибрации; $m = \frac{d_1}{d_0}$ – коэффициент модуляции.

Моделируемый чувствительный элемент имеет круглую в плане форму. С учетом принципа эквипотенциальности проводящей поверхности чувствительного элемента, его электрический заряд при этом будет изменяться по закону

$$q_p(t, x) = d(t) \int_0^R \frac{q_s}{((r+x)^2 + d^2(t))^{\frac{3}{2}}} dr,$$

где q_s – ассоциированный с дефектом электрический заряд; R – радиус чувствительного элемента; x – расстояние от дефекта до проекции центра чувствительного элемента.

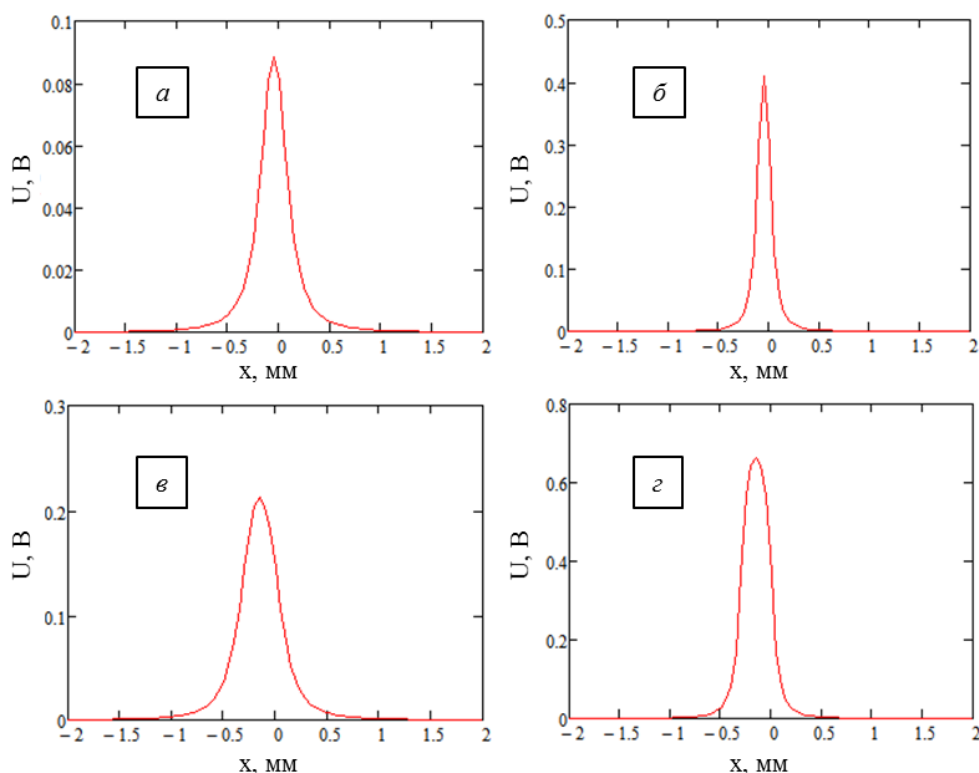
Регистрируемое значение КРП U_{CPD} , с учетом фазового детектирования, составит

$$U_{CPD}(x) = \max(q_p(t, x) \cdot C(t)),$$

где $C(t)$ – электрическая емкость динамического конденсатора.

В модели рассматривались зонды диаметром $D = 0,2$ мм и $D = 0,6$ мм. Частота вибрации в обоих случаях составляла $f = 300$ Гц, амплитуда вибрации $d_1 = 0,05$ мм. Диапазон координат сканирования составлял $x = [-2 \text{ мм} \dots 2 \text{ мм}]$, шаг перемещения зонда $0,05$ мм. В модели использовались различные установки зазора «зонд-образец» d_0 с учетом известных данных [2] о влиянии зазора на разрешающую способность

сканирования. Изменение величины сигнала в процессе линейного сканирования при различных установках зазора «зонд-образец» графически показано на рисунке 1.

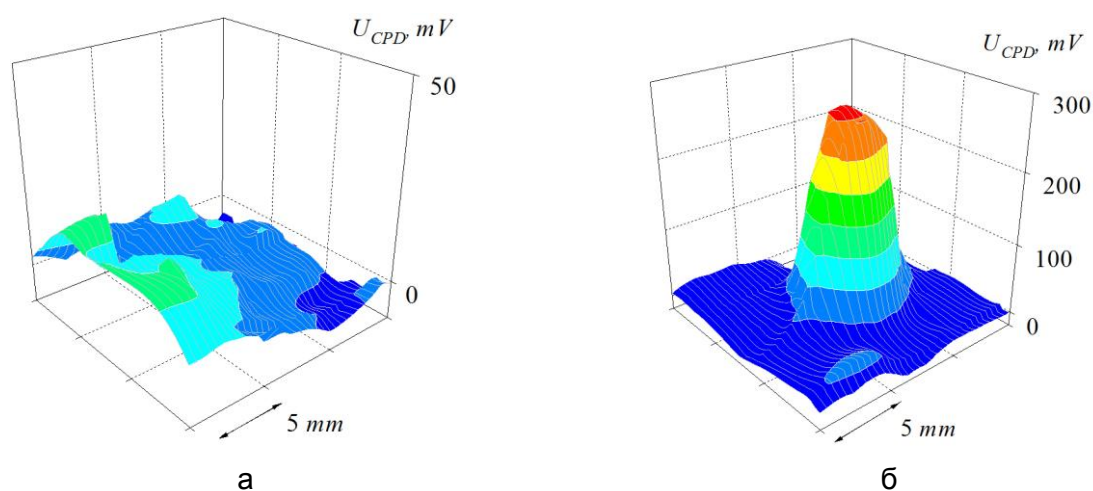


а) Диаметр зонда $D = 0,2$ мм, зазор $d_0 = 0,2$ мм; б) $D = 0,2$ мм, $d_0 = 0,1$ мм; в) $D = 0,6$ мм, $d_0 = 0,2$ мм; г) $D = 0,6$ мм, $d_0 = 0,1$ мм

Рисунок 1 – Модель обнаружения дефекта зондом Кельвина в режиме сканирования поверхности

Результаты моделирования показали, что для зонда диаметром 0,2 мм при сканировании с зазором 0,1 мм минимальный обнаружимый заряд составляет $0,6 \cdot 10^{-17}$ Кл. При таких условиях максимальное значение выходного сигнала превышает 2 мВ, что позволяет достоверно выделять сигнал на фоне шумов и наводок. Погрешность локализации выявляемых дефектов определяется в основном значением зазора «зонд-образец». Изменение диаметра зонда не оказывает существенного влияния на среднее квадратическое отклонение распределения сигнала, а влияет только на форму кривой распределения. Как размеры выявляемых дефектов, так и погрешность их локализации могут составлять величину много меньшую размера зонда. Как следует из рисунка 1, б, при использовании зонда диаметром 0,2 мм, перемещающегося с зазором 0,1 мм над поверхностью образца, положение единичного дефекта может быть локализовано с неопределенностью порядка $\pm 0,05$ мм.

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальная проверка расчетной модели выполнялась на основе исследования и анализа закономерностей формирования сигнала электрометрического зонда при взаимодействии с поверхностью диэлектриков, в частности, образцов из полиэтилена высокого давления (ПЭВД) с известной характеристикой неоднородности поверхности – концентрация механических напряжений. Механические напряжения в образце были вызваны давлением, создаваемым вакуумным прижимом, фиксирующим образец на предметном столике системы сканирующего зонда Кельвина. Для образцов выполнены измерения пространственного распределения электрического потенциала поверхности с использованием сканирующего режима электрометрического зонда при воздействии вакуумным прижимом (рисунок 2, б) и без воздействия (рисунок 2, а).



а) без вакуумного прижима, б) с вакуумным прижимом

Рисунок 2 – Карты пространственного распределения поверхностного потенциала образца на основе полиэтилена высокого давления

Результаты зондового картирования, в случае диэлектрического материала, хорошо согласуются с расчетной моделью взаимодействия электрометрического зонда с единичным дефектом поверхности. Следует отметить, что результаты приведенных экспериментальных исследований подтверждают возможность использования методов зондовой электрометрии для исследования пьезоэлектрических свойств материала.

Заключение. Таким образом, в области методов зондовой электрометрии при контроле однородности параметров поверхности диэлектрических материалов актуальными остаются вопросы, связанные с априорной информацией о природе локализованных потенциалов конкретного объекта контроля, а также влияния на результаты измерений собственных (создаваемых локализованным зарядом) и внешних электрических полей. Важным также является проработка особенностей структуры как поверхности, так и внутренних границ разделов (включения, скрытые полости, кластеры и другие дефекты) в объеме тонкого поверхностного слоя, участвующего в измерениях.

Список литературы

1. Пантелеев К. В., Свистун А. И., Тявловский А. К., Жарин А. Л. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов // Приборы и методы измерений. 2016. № 2(7). С. 136–144.
2. Тявловский А. К. Математическое моделирование дистанционной зависимости разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина // Приборы и методы измерений. 2012. № 1(4). С. 31–36.
3. Wicinski M., Burgstaller W., Hassel A. W. Lateral resolution in scanning Kelvin probe microscopy // Corrosion Science. 2016. Vol. 104. P. 1–8.
4. Пантелеев К. В., Микитевич В. А., Жарин А. Л. Построение измерителей контактной разности потенциалов // Приборы и методы измерений. 2016. № 1(7). С. 7–15.