

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА.

Овчинникова Е.В.

Рязанский военный автомобильный институт

Рязань, Россия

poligrafik@yandex.ru

Процесс формирования покрытий в электрическом поле методом электрофореза получил достаточно широкое применение, в частности, используется как один из способов нанесения диэлектрика при производстве элементов РЭА. Одним из показателей качества диэлектрических пленок является их равномерность.

Элементы, на которые наносится диэлектрическое покрытие, имеют сложную форму и конечные размеры, что вызывает неравномерность напряженности электрического поля. В результате осаждаемое диэлектрическое покрытие получается неравномерным по толщине. Для тонких пленок, когда 10% разницы в толщине составляют десятые доли микрометра, актуальной становится задача теоретического исследования влияния формы электродов на качество покрытий.

В электрохимических методах нанесения покрытий различают действия первичного и вторичного электрических полей. Первичное поле описывается уравнениями Пуассона или Лапласа, зависит от геометрических параметров системы электродов и оказывает основное влияние на разницу в толщине. Действие вторичного тока обусловлено электрохимическими параметрами рабочей среды.

Исследование распределения первичного электрического поля и его влияния на равномерность получаемых тонкопленочных покрытий проведено для системы электродов, имеющих гребенчатую форму и применяемой при производстве стеклокерамических конденсаторов. Схема расположения электродов исследуемой системы – катод между двумя анодами. Форма зубца гребенки приведена на рисунке 1.

При отсутствии в рассматриваемой системе свободных объемных зарядов распределение потенциального электрического поля подчиняется уравнению Лапласа:

$$\nabla^2 \varphi(r) = 0, \quad (1)$$

где $\varphi(r)$ – функция потенциала в трехмерном точечном евклидовом пространстве $(r) \in (x, y, z)$. Уравнение Лапласа в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения Лапласа в частных производных найдено с использованием метода конечных разностей. Суть данного метода состоит в том, что совокупность значений потенциала поля находится путем замены одного описывающего поле дифференциального уравнения системой простых линейных уравнений в конечных разностях. Эти уравнения связывают значение потенциала в каждой точке со значениями потенциала в соседних точках. Разностный эквивалент уравнения Лапласа имеет вид:

$$\varphi_{i+1,k,l} + \varphi_{i,k+1,l} + \varphi_{i,k,l+1} + \varphi_{i-1,k,l} + \varphi_{i,k-1,l} + \varphi_{i,k,l-1} - 6\varphi_{i,k,l} = 0. \quad (3)$$

Граничные значения потенциального поля были определены из условия симметрии элементов электродной системы и равномерного распределения потенциала между электродами в местах, значительно удаленных от краев [5].

Таким образом, математическая модель рассматриваемой системы имеет вид:

$$[A] \cdot \Phi = B, \quad (4)$$

где $[A]$ – матрица размером $n \times n$, составленная из коэффициентов при неизвестных, при этом номер строки матрицы соответствует номеру узловой точки; n – количество узловых точек сис-

темы, в которых определяется значение потенциала; Φ – вектор решения; B – вектор свободных членов, заданных исходя из граничных условий.

Программная реализация модели осуществлена в системе программирования Delphi 5.0. С использованием разработанной математической модели проведено исследование потенциального поля вблизи поверхности катода. В результате проведенных расчетов для исследуемой системы электродов было установлено:

- 1) максимальный разброс был определен в сечении 1-10 и 3-12 (рисунок 1);
- 2) неравномерность поля можно уменьшить изменением соотношения геометрических параметров системы электродов;
- 3) значительное увеличение межэлектродного расстояния h приведет к уменьшению напряженности поля в области катода и снижению производительности технологической операции.

Для установления близости модели реальному объекту (установление адекватности модели) поставлена серия опытов. Для оценки дисперсии воспроизводимости поставлена отдельная серия опытов. В качестве критерия оценки модели был использован коэффициент неоднородности поля, под которым понимают отношение максимальной напряженности в промежутке к средней напряженности:

$$f = \frac{E_{\max}}{E_{cp}}. \quad (5)$$

В качестве критерия оценки реального объекта был принят коэффициент неравномерности толщины тонкой пленки, под которым понимают отношение максимальной толщины пленки в рассматриваемом сечении к ее среднему значению:

$$f' = \frac{\delta_{\max}}{\delta_{cp}}. \quad (6)$$

Замер толщины пленки проводился в характерных точках зубца гребенчатого электрода (рисунок 1).

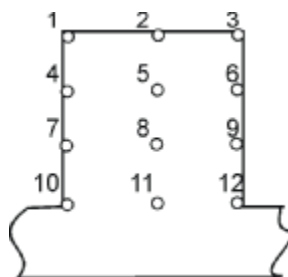


Рисунок 1

Расчетные значения неоднородности поля и соответствующие им значения неравномерности толщины на основе экспериментальных измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэф-т неоднородности	Сечение				
	1-3	2-11	1-10	3-12	10-12
$f_{\text{расч. поля}}$	1,07	1,12	1,16	1,16	1,02
$f_{\text{эксп. пленки}}$	1,06	1,21	1,29	1,28	1,04

Из приведенных данных видно, что неравномерность толщины наносимого покрытия соответствует расчетной неоднородности потенциального поля у поверхности заготовки электродов. Это позволяет сделать вывод о целесообразности использования предложенной модели для исследования потенциального поля и оценки такого качественного показателя как равномерность при формировании тонкопленочных диэлектриков методом электрофореза.