

значение, оказавшееся в упорядоченном массиве в позиции $M/2$, т.е. в середине массива. Достоинство такого алгоритма, помимо исключения субъективного фактора при выборе весовых коэффициентов и отсутствия «размытия» контуров, заключается в эффективном устранении одиночных выбросов из изображения независимо от их местоположения относительно фильтруемого пикселя.

Наибольшей эффективностью характеризуется алгоритм фильтрации на основе вычисления двумерной корреляционной функции для каждого пикселя изображения и использования то-

чечных отсчетов этой функции в качестве весовых коэффициентов для индексов соответствующих пикселей из окрестности. Данный алгоритм отличает повышенный объем вычислений, что увеличивает время картирования. В то же время, язык программирования LabTalk содержит встроенные средства корреляционной фильтрации, что позволило реализовать данный механизм фильтрации в упоминавшихся экспериментальных исследованиях (в частности, приведенные на рисунке 1 изображения получены с использованием корреляционной фильтрации по окрестности радиусом $r = 3$).

УДК 620.179.11

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДА С НЕОДНОРОДНО ЗАРЯЖЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ДИЭЛЕКТРИКА

Тявловский А.К.¹, Жарин А.Л.¹, Гусев О.К.¹, Тявловский К.Л.¹, Воробей Р.И.¹, Дубаневич А.В.¹, Жуковский П.²

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Люблинский технический университет
Люблин, Республика Польша

При исследовании диэлектриков зондовыми электрометрическими методами в измерительной схеме присутствуют не две (поверхность зонда и поверхность образца), а четыре поверхности: рабочая поверхность зонда, верхняя и нижняя поверхности диэлектрического образца, верхняя поверхность проводящего держателя образцов, на которой размещается исследуемый диэлектрический образец. При этом понятие работы выхода электрона применимо только к проводящим поверхностям зонда и держателя. Поверхность диэлектрика, в общем случае, имеет фиксированный заряд с поверхностной плотностью σ_0 . При наличии ненулевой КРП между материалами зонда и держателя поверхности последних также будут иметь электрический заряд с поверхностной плотностью σ_P и σ_H , соответственно. Это приводит к возникновению на верхней и нижней поверхностях диэлектрического образца дополнительных наведенных зарядов с плотностью σ' и $-\sigma'$, равных по величине и противоположных по знаку, в соответствии с законом сохранения заряда. Наличие распределенных в пространстве электрических зарядов приводит к возникновению в системе электростатического поля напряженностью E в пространстве между зондом и образцом и E' в толще образца. Схематично описанная физическая модель взаимодействия заряженной поверхности диэлектрика с чувствительными элементами электрометрических средств измерений изображена на рисунке 1, где t – толщина диэлектриче-

ского образца, d – расстояние между поверхностью диэлектрика и электрометрическим зондом.

Полная математическая модель взаимодействия заряженной поверхности диэлектрика с чувствительными элементами электрометрических средств измерений должна учитывать динамический характер измерительного конденсатора C_1 (рисунок 2), расстояние между пластинами d которого изменяется по закону

$$d(t) = d_0 + d_m \sin \omega t, \quad (1)$$

где d_0 – начальный (статический) зазор;
 d_m – амплитуда модуляции зазора;
 ω – круговая частота модуляции.

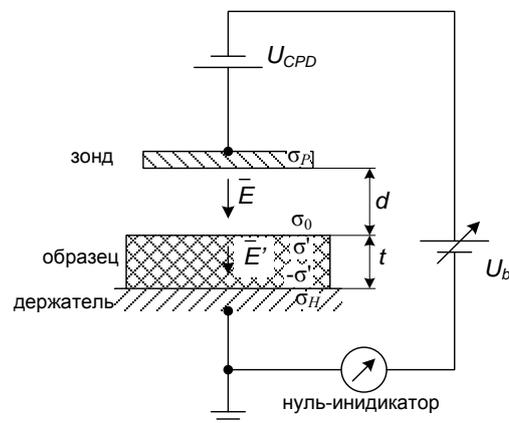


Рисунок 1 – Физическая модель взаимодействия заряженной поверхности диэлектрика с электрометрическим зондом

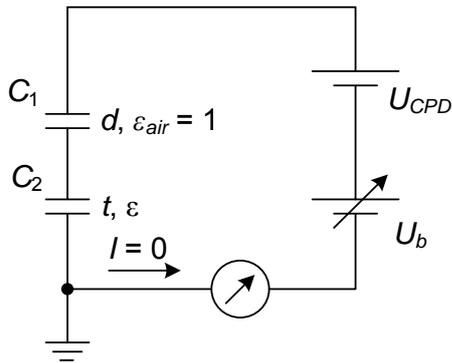


Рисунок 2 – Эквивалентная электрическая схема взаимодействия заряженной поверхности диэлектрика с электрометрическим зондом

Заряд σ_0 на поверхности диэлектрика создает наведенный заряд σ_p на поверхности зонда, компенсируемый, в рамках нулевого метода измерений, за счет работы включенного в цепь обратной связи источника напряжения компенсации U_b . При условии равномерного распределения заряда σ_0 по поверхности диэлектрика последний, в рамках практических измерений, может рассматриваться как бесконечная равномерно заряженная плоскость, силовые линии электрического поля которой параллельны и направлены нормально к плоскости. При этом напряженность электрического поля E и величина наведенного заряда σ_p не будут зависеть от расстояния d между зондом и поверхностью диэлектрика, вследствие чего выходной сигнал не будет изменяться в процессе вращении пластины динамического конденсатора.

При неравномерном распределении заряда по поверхности диэлектрика создаваемое им электростатическое поле является неоднородным в пространстве, что, с учетом конечных размеров электрометрического зонда, приводит к формированию дистанционной зависимости наведенного заряда σ_p и, соответственно, выходного сигнала электрометрического зонда. Про моделируем данную зависимость на примере точечного (много меньшего поперечных размеров зонда) заряда q_s , расположенного по оси зонда на в остальном равномерно заряженной (в частном случае, электронейтральной) плоской поверхности диэлектрика.

Примем сечение электрометрического зонда в виде окружности радиусом R , что соответствует общепринятой практике (рисунок 3). Оценить величину наведенного заряда можно, воспользовавшись методом изображений. Аналогично [1], математическая модель величины суммарного заряда q_p поверхности зонда может быть построена на основе интегрирования наведенной плотности заряда по всей площади зонда:

$$q_p = d(t) \int_0^R \left(\frac{q_s}{(r^2 + (d(t))^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \partial r. \quad (2)$$

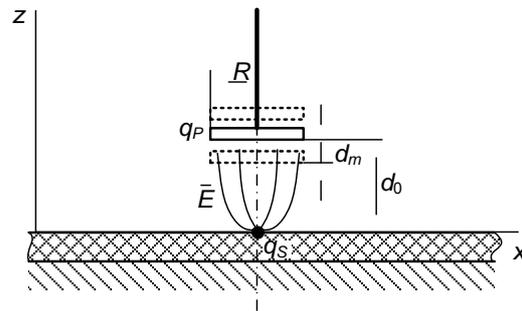


Рисунок 3 – Физическая модель взаимодействия точечного заряда на поверхности диэлектрика с электрометрическим зондом

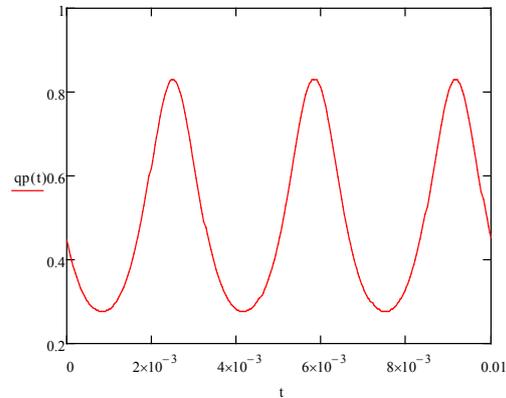


Рисунок 4 – Результат математического моделирования выходного сигнала электрометрического зонда при исследовании неоднородно (точечно) заряженной поверхности диэлектрика

Подставляя (1) в (2), получаем

$$q_p = (d_0 + d_m \sin \omega t) \int_0^R \left(\frac{q_s}{(r^2 + d_0^2 + d_0 d_m \sin \omega t + d_m^2 \sin^2 \omega t)^{\frac{3}{2}}} \right) \partial r. \quad (3)$$

Можно видеть, что уравнение (3) описывает периодическую функцию сложного гармонического состава. Решение (3) в общем виде возможно, однако нецелесообразно вследствие его громоздкости. В то же время, полученное выражение хорошо поддается решению численными методами, например, с использованием программной среды MathCAD. В частности, на рисунке 4 показан пример решения математической модели (3) для электрометрического зонда радиусом 0,5 мм, расположенного на высоте 1 мм от поверхности диэлектрика и вибрирующего с амплитудой 0,3 мм на частоте 300 Гц, представленный в виде графика временной зависимости (осциллограммы) выходного сигнала зонда. Видно, что, в отличие от случая равномерно заряженной

поверхности, выходной сигнал электрометрического зонда содержит значительную по амплитуде переменную составляющую, причем при синусоидальной модуляции зазора в динамическом конденсаторе результирующий сигнал не является синусоидальным, а содержит значительные гармонические искажения. В то же время, полученная в результате моделирования осциллограмма отличается от формы сигнала, получаемого при контроле дефектов поверхностей проводящих и полупроводниковых поверхностей [2]. Это позволяет предполагать возможность различения места локализации дефекта (подложка или диэлектрическое покрытие) в

композитных структурах, к примеру, структурах кремний-диэлектрик, на основе анализа спектрального состава измерительного сигнала.

1. Тявловский, А.К. Математическое моделирование дистанционной зависимости разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1(4). – С. 30-36.

2. Tyavlovsky, A. Complex-harmonic analysis of electric circuit containing a vibrating-plate capacitor / A. Tyavlovsky, A. Zharin // Informatyka, Automatyka, Pomiarы w gospodarce i ochronie srodowiska. – 2012. – № 1. – P. 32-35.

УДК 681.7.023.72

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВУСТОРОННЕГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДВОЯКОВЫПУКЛЫХ ЛИНЗ

Филонова М.И., Кузнечик В.О., Семенкович В.П., Тищенко А.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В традиционной технологии финишного формообразования высокоточных линз выбор режимов обработки в каждом конкретном случае определяет оператор опытным путем, что приводит к непроизводительным затратам времени и, следовательно, повышает себестоимость продукции.

Отмеченных недостатков можно избежать, если провести предварительный расчет интенсивности съема материала в той или иной зоне детали в зависимости от величины наладочных параметров станка. В основу такого моделирования процесса обработки целесообразно положить гипотезу Ф. Престона, согласно которой производительность обработки пропорциональна при прочих равных условиях параметру $Q = pl$, где p – давление в зоне соприкосновения притирающихся поверхностей инструмента и детали, l – длина пути трения произвольно выбранной на поверхности детали опорной точки A относительно инструмента.

Для определения составляющей l параметра Q найдем линейную скорость скольжения $\vec{v}_{ск}$ опорной точки по формуле

$$\vec{v}_{ск} = \vec{v}_д - \vec{v}_и, \quad (1)$$

где $v_д$ – линейная скорость вращения детали; $v_и$ – линейная скорость движения инструмента, которую можно представить в виде

$$\vec{v}_и = \vec{v}_в - \vec{v}_{вв}, \quad (2)$$

где $v_в$ и $v_{вв}$ – составляющие линейной скорости инструмента, обусловленные его вращательным и возвратно-вращательным движениями; $i = 1, 2$.

Входящие в выражения (1) и (2) линейные скорости представим в виде

$$(3) \quad \begin{cases} \vec{v}_A = \vec{\omega}_д \vec{r}_i \\ \vec{v}_{ив} = \vec{\omega}_и \vec{r}_i \\ \vec{v}_{ик} = \vec{\Omega}_и \vec{r}_i, \end{cases}$$

где $\omega_д$, $\omega_и$ и $\Omega_и$ – скорости вращения соответственно детали, инструмента и возвратно-вращательного движения последнего, причем, согласно [1], $\omega_и = (0,7 \div 0,9) \omega_д$; r_i – радиус кривизны обрабатываемой поверхности.

Выражение для расчета скорости $\Omega_и$ получим из рис. 1, на котором представлена векторная кинематическая схема рабочей зоны устройства для одновременной двусторонней обработки двояковыпуклых линз [2], устанавливаемого на серийные шлифовально-полировальные и полировально-доводочные станки мод. ШП и ПД.

Определим далее составляющую p параметра Q . На рис. 2 представлено распределение давления в зоне контакта детали 1 с инструментом 2 в различных его положениях при возвратно-вращательном движении по обрабатываемой поверхности.

Если принять, что инструмент в процессе обработки не деформируется, то когда он не выходит за край детали, т.е. амплитуда его возвратно-вращательного движения не превышает величины $L_{мин} = (d_д - d_и)/2$, где $d_и$ – диаметр инструмента (инструмент в положении I на рис. 2, а), давление по всей поверхности сопряжения притирающихся поверхностей распределено равномерно и принимает значение $p_о = Q/S_n$, где Q – рабочее усилие, S_n – максимальная площадь сопряжения, равная площади инструмента. Если