

УДК 621.382

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ МЕТОДАМИ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ
Тявловский А.К.¹, Жарин А.Л.¹, Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Свистун А.И.¹, Мухуров Н.И.², Микитевич В.А.¹

¹Белорусский национальный технический университет
 Минск, Республика Беларусь

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерные системы»
 Минск, Республика Беларусь

Особенности контроля сенсорных структур, включающих проводящую подложку и покрытие из пористого анодного оксида алюминия (ПАОА), методами зондовой электрометрии определяются одновременным присутствием в пределах контролируемого участка слоев с проводящими и диэлектрическими свойствами. При этом физические основы и модели формирования измерительного сигнала электрометрического зонда при взаимодействии с проводниками и диэлектриками существенно различаются. В первом случае величина регистрируемого сигнала определяется разностью значений работы выхода электрона (РВЭ) проводника (как правило, металла) и электрометрического зонда. РВЭ является одной из фундаментальных характеристик твердого тела и не подвержена изменениям во времени или вследствие изменения факторов окружающей среды. В случае диэлектриков измерительный сигнал определяется плотностью и расположением статического электрического заряда в диэлектрике (в том числе связанного заряда диполей в случае полярного диэлектрика), который может являться функцией условий окружающей среды. В реальных условиях измерения плотность заряда в диэлектрике, как правило, претерпевает изменения во времени, а величина регистрируемого измерительного сигнала зависит от расстояния между электрометрическим зондом и зарядом в образце.

Вследствие особенностей структуры (нанопористости) слой ПАОА склонен к накоплению электрического заряда, что, в частности, находит практическое применение в датчиках космической плазмы [1]. Схема взаимодействия электрометрического зонда с такой сенсорной структурой показана на рисунке 1. При измерениях исследуемая структура располагается на заземленном основании, вследствие чего потенциал проводящей металлической подложки тождественно равен нулю. Поскольку глубина проникновения электрического поля в металл ограничена Дебаевской длиной экранирования, составляющей для металлов единицы атомных слоев, толщина металлического слоя композитной структуры не имеет значения с точки зрения физико-математического моделирования и не учитывается в модели. Электрическое поле

в толще диэлектрика, напротив, является объектом моделирования.

Обозначим толщину диэлектрического слоя ПАОА как d_1 , а его диэлектрическую проницаемость как ϵ_d . Расстояние между электрометрическим зондом и поверхностью проводящей подложки составляет d_2 . Измерения выполняются при нормальных условиях, диэлектрическая проницаемость воздуха в зазоре между электрометрическим зондом и поверхностью диэлектрического слоя составляет ϵ_a .

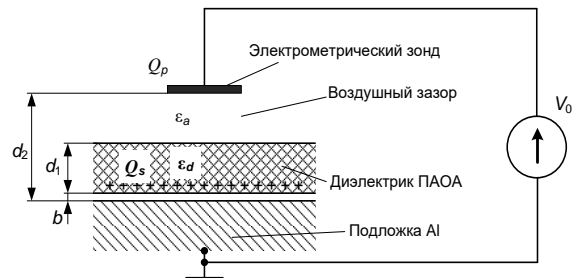


Рисунок 1 – Схема взаимодействия электрометрического зонда с композитной структурой «алюминиевая подложка – ПАОА»

Обозначим плотность заряда в диэлектрике вблизи границы раздела как Q_s . Поскольку переход этого заряда в заземленную подложку в процессе измерений исключен, в модель введен фиктивный воздушный зазор b бесконечно малой величины, условно разделяющий границу раздела на две параллельные плоскости с плотностями заряда Q_s на верхней плоскости и 0 – на нижней. Объем диэлектрика при этом также, в общем случае, содержит некоторый заряд с объемной плотностью Q_v .

Вследствие наличия контактной разности потенциалов (КРП) между материалами зонда и подложки и присутствия заряда плотностью Q_s и Q_v в зазоре d_2 на поверхности электрометрического зонда также будет наводиться электрический заряд некоторой плотностью Q_p .

При измерениях по методу вибрирующего зонда Кельвина зазор d_2 модулируется по закону

$$d_2(t) = d_0 + d_m \cos \omega t, \quad (1)$$

где d_0 – средняя величина зазора зонд - подложка; d_m – амплитуда вибрации электрометрического

зонда; ω – частота вибрации электрометрического зонда.

Поскольку воздух является однородной средой, электрические потенциалы в зазоре зонд – поверхность образца V_a и фиктивном зазоре b V_b изменяются в соответствии с линейными законами

$$V_a = K_{a1}x + K_{a2}; \quad (2)$$

$$V_b = K_{b1}x + K_{b2}, \quad (3)$$

где $K_{a1}, K_{a2}, K_{b1}, K_{b2}$ – некоторые константы.

Значения констант можно найти, применяя к заряду в диэлектрике и воздушном зазоре теорему Гаусса и используя граничные условия:

$$\begin{cases} V_a(d_2) = V_0 \\ V_b(0) = V_d(0) \\ V_a(d_1) = V_d(d_1), \\ V_b(-b) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где V_0 – приложенный к электрометрическому зонду внешний электрический потенциал; координата $x = 0$ соответствует границе раздела подложка-ПАОА.

Решения для констант имеют вид:

$$K_{d1} = \frac{-\frac{Q_v d_1^2}{2\epsilon_d} + \frac{Q_s b}{\epsilon_a} + \frac{Q_s d_1^2}{\epsilon_a} - V_0 - \frac{Q_v d_1 d_2}{\epsilon_a}}{\frac{\epsilon_d d_1}{\epsilon_a} - \frac{\epsilon_d d_2}{\epsilon_a} - d_1 - \frac{\epsilon_d b}{\epsilon_a}}; \quad (5)$$

$$K_{b1} = \frac{\epsilon_d \left(-\frac{Q_v d_1^2}{2\epsilon_d} + \frac{Q_s b}{\epsilon_a} + \frac{Q_v d_1^2}{\epsilon_a} - V_0 - \frac{Q_v d_1 d_2}{\epsilon_a} \right) + \frac{Q_v b}{\epsilon_a}}{\epsilon_a \left(\frac{\epsilon_d d_1}{\epsilon_a} - \frac{\epsilon_d d_2}{\epsilon_a} - d_1 - \frac{\epsilon_d b}{\epsilon_a} \right)}; \quad (6)$$

$$K_{a1} = \frac{\epsilon_d \left(-\frac{Q_v d_1^2}{2\epsilon_d} + \frac{Q_s b}{\epsilon_a} + \frac{Q_v d_1^2}{\epsilon_a} - V_0 - \frac{Q_v d_1 d_2}{\epsilon_a} \right)}{\epsilon_a \left(\frac{\epsilon_d d_1}{\epsilon_a} - \frac{\epsilon_d d_2}{\epsilon_a} - d_1 - \frac{\epsilon_d b}{\epsilon_a} \right)} - \frac{Q_v d_1}{\epsilon_a}. \quad (7)$$

Наведенная плотность заряда на поверхности чувствительного элемента электрометрического зонда Q_p может быть рассчитана на основании выражения

$$Q_p = -\epsilon_a E_d = \epsilon_a K_{a1}. \quad (8)$$

Подставляя K_{a1} из выражения (7) в (8) и дифференцируя с учетом (1), найдем ток $i(t)$ в цепи, соединяющей электрометрический зонд с металлической подложкой композитного образца:

$$i(t) = S \frac{dQ_p}{dt} = \frac{S \epsilon_a^2 d_m \sin \omega t \left(V_0 - \frac{Q_v d_1^2}{2\epsilon_d} - \frac{Q_v d_1 b}{\epsilon_d} - \frac{Q_s b}{\epsilon_a} \right)}{\left(\frac{\epsilon_d d_1}{\epsilon_a} - \frac{\epsilon_d d_2}{\epsilon_a} - d_1 - \frac{\epsilon_d b}{\epsilon_a} \right)^2}. \quad (9)$$

Методика измерений предусматривает приведение тока в цепи электрометрического зонда к нулю за счет автоматического регулирования приложенного к чувствительному элементу зонда электрического потенциала V_0 . В соответствии с (9), нулевое значение переменного тока $i(t) = 0$ достигается при выполнении условия

$$V_0 = \frac{Q_v d_1^2}{2\epsilon_d} + \frac{Q_v d_1 b}{\epsilon_d} + \frac{Q_s b}{\epsilon_a}. \quad (10)$$

Контактная разность потенциалов между проводящей подложкой и диэлектрическим слоем (внутренняя КРП композитной структуры) может быть вычислена путем интегрирования выражения (6):

$$V_{CPDin} = \int_{-b}^0 K_{b1} dx = \frac{Q_s b}{\epsilon_a} + \frac{Q_v b d_1}{\epsilon_a}. \quad (11)$$

Из сопоставления (10) и (11) следует, что

$$V_0 = V_{CPDin} + \frac{Q_v d_1^2}{2\epsilon_d}. \quad (12)$$

Можно видеть, что составляющие состояние внутренней границы раздела композитной структуры КРП и заряд в ПАОА складываются аддитивно. Полученная модель удовлетворяет критерию разделения параметров в односигнальной многопараметрической модели измерений, т.е. существует методика обработки измерительного сигнала, обеспечивающая разделение вклада его отдельных составляющих. Можно видеть, что при отсутствии заряда в диэлектрике ($Q_v = 0$) уравнение (12) переходит в классическое выражение для компенсационного метода измерений КРП с полной компенсацией [2], согласно которому компенсирующее напряжение V_0 в установившемся режиме равняется измеряемой КРП V_{CPD} .

Основные операции контроля дефектов композитных структур, обеспечивающие разделение вклада двух составляющих сигнала электрометрического зонда, можно свести к следующей последовательности действий:

1. Регистрация пространственного распределения электрического потенциала поверхности композитной структуры в исходном состоянии. Определяемая величина сигнала V_0 при этом соответствует суммарному потенциалу структуры с учетом объемного заряда в диэлектрическом слое согласно выражению (12).

2. Разряжение диэлектрического слоя путем воздействия на поверхность ультрафиолетовым излучением.

3. Повторная регистрация пространственного распределения электрического потенциала поверхности композитной структуры. Определя-

емая величина сигнала V_0 при этом соответствует КРП проводящей подложки, а регистрируемое распределение V_0 отражает распределение дефектов внутренней границы раздела композитной структуры.

4. Взаимное вычитание пространственных распределений сигнала электрометрического зонда, полученных на шагах 1 и 3. Получаемое в результате разностное распределение отражает распределение объемного заряда диэлектрического слоя, соответствующее распределению дефектов диэлектрического слоя.

УДК 621.396

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ САПР В ЭЛЕКТРОННОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Савёлов И.Н., Довнар А.С., Плытник Е.А., Савёлов П.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Применение систем автоматизированного проектирования (САПР) при конструировании электронных приборов позволяет сократить время проектирования оптимальной конструкции благодаря возможности проверки большого количества конструктивных вариантов.

В настоящее время организация процесса проектирования новых изделий реализуется два механизма: сборка “снизу вверх” и сборка “снизу вверх”.

Проектирование электронных узлов, начинается с разработки электрических схем, оптимизации топологии печатных плат и разработки конструкции печатного узла (конструирование снизу вверх). Проектирование электронных приборов в целом осуществляется с конструирования механической части приборов: несущей конструкции, защитного корпуса (конструирование сверху вниз) и только затем разработки конструкции печатного узла.

Увеличение жизненного цикла проектируемого изделия путём интенсификации процесса проектирования и оптимизации технических решений невозможно без коллаборации и интеграции САПР.

Наиболее распространённой схемотехнической САПР является Altium Designer, а для разработки механической части электронных приборов широко применяется система твердотельного моделирования SolidWorks.

В этих САПР реализована возможность обмена конструкторскими решениями разрабатывая при этом единую модель

Кроме того, Altium Designer разработала интегрированный в SolidWorks PCB модуль позволяющий в одной системе реализовывать все этапы жизненного цикла включая применение CALS-технологий при проектировании. Это существенно снижает себестоимость продукции и

Литература

1. Мухуров, Н.И. Особенности формирования прецизионных чувствительных элементов датчиков космической плазмы / Н.И. Мухуров, И.В. Гасенкова, И.М. Андрухович // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 1. – С. 48–56.
2. Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping. In book: Applied Scanning Probe Methods, Vol. 14, Edited by B. Bhushan, Springer-Verlag, Heidelberg, 2010. – P. 159–198.

обеспечивает электронную интеграцию всей разработанной документации от создания проекта изделия до его утилизации

Целью данной работы является применение при разработке электронных приборов коллаборационных и интеграционных возможностей САПР Soliworks и Altium Designer.

При разработке конструкции цифрового дозиметра был реализован механизм проектирования “снизу вверх”. На основании разработанной электрической схемы была оптимизированна топология печатной платы (рис. 1) и создана 3D модель печатного узла.

Коллаборация применяемых САПР позволяет без дополнительных действий производить обмен разработанными конструкциями. На основе созданной в Altium Designer модели печатного узла при помощи САПР SolidWorks была разработана его твердотельная модель (рис. 2).

В данном случае выявились недостатки проектирования “снизу вверх”, т. к. геометрические параметры печатного узла являются неизменяемым фактором, ограничивающим выриативность конструктивных исполнений дозиметра.

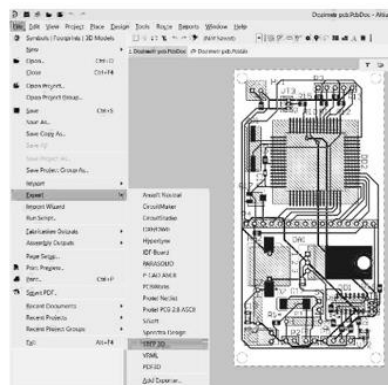


Рисунок 1 – Топология печатной платы