

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

© 2014 г. Н.С. ПЩЕЛКО, М.П. СЕВРЮГИНА

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург
e-mail: nikolsp@mail.ru

О качестве диэлектрических материалов, входящих в состав металлодиэлектрических структур (МДС), например, рабочих структур конденсаторов, принято судить по значениям емкости, тангенса угла потерь и сопротивления изоляции (тока утечки). Первые измеряются, как правило, на частотах не ниже промышленной, а последние – через короткое (около одной минуты) время после приложения постоянного напряжения. Вместе с тем, как показывает накопленный опыт испытаний и применения технических устройств на основе МДС, стандартные параметры-критерии годности диэлектрических материалов не информативны для обнаружения потенциально опасных дефектов, ограничивающих долговременную надежность изделия. Это заставляет искать новые подходы и электрофизические методы неразрушающего контроля.

Особенности строения технических диэлектриков (структурная разупорядоченность, структурная и фазовая неоднородности) проявляются в их кинетических свойствах. Так, фазовая неоднородность создает предпосылки для миграционной поляризации – наиболее медленного из всех механизмов поляризации. Ниже будет представлена математическая модель миграционной поляризации, из которой следует, что постоянная времени этого процесса при комнатной температуре может на несколько порядков величины превышать одну минуту. Доминирующим механизмом переноса заряда в рассматриваемых материалах выступает прыжковая электропроводность, осуществляемая посредством термически активированных перескоков носителей заряда между локализованными состояниями. Разброс центров локализации по взаимным расстояниям и энергиям приводит к экспоненциально широкому распределению времен релаксации, соответствующих элементарным актам переноса. Основные в рассматриваемом аспекте процессы переноса – поляризация и электропроводность в высокоомных неупорядоченных материалах в широком диапазоне частот – представляются следующим образом. На высоких частотах определяющей является двухузельная прыжковая электропроводность, когда за полупериод внешнего переменного напряжения носитель заряда успевает совершить только один перескок между центрами локализации. С понижением частоты количество прыжков носителей заряда за полупериод напряжения возрастает и происходит переход к мультиплетной прыжковой электропроводности на переменном токе по протяженной цепочке локализованных состояний. На самых низких частотах (больших временах) размеры этой цепочки становятся столь велики, что она замыкает электроды (в терминах теории прыжковой электропроводности в системе образуется бесконечный кластер локализованных состояний, участвующих в переносе заряда), и устанавливается статическая проводимость. Рассмотренная картина переноса заряда была положена в основу изыскания подхода к неразрушающему контролю качества МДС технических устройств, изучаемых в данной работе. В качестве критериальных выступали следующие требования:

- чувствительность используемых параметров и характеристик к воздействию электрического поля (ЭП);

- информативность используемых электрофизических параметров и характеристик в плане выявления потенциально опасных дефектов.

Обоим требованиям удовлетворяют низкочастотные и статические электрические характеристики изучаемых диэлектриков в слабых ЭП, т.к. они наиболее чувствительны к потенциально опасной фазовой и структурной неоднородности материала [1].

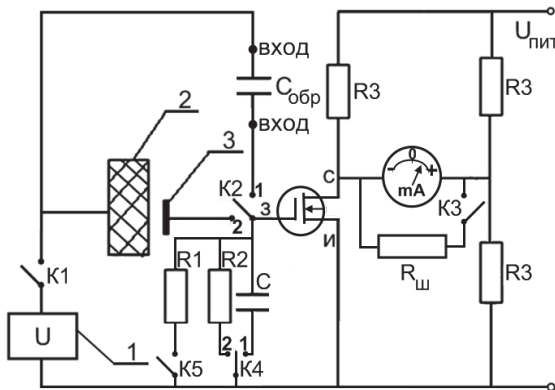


Рис. 1. Измерительное устройство для определения комплекса статических характеристик диэлектрических материалов. 1 –регулируемый источник постоянного напряжения, 2 – электрет, 3 – измерительный электрод. 3 - затвор, И -исток, С - сток.

Разработаны методы и устройство, Рис. 1, для измерения следующего комплекса низкочастотных (статических) характеристик диэлектрических материалов: высокого сопротивления (до 10^{13} Ом), электрической емкости (от десятков пФ), поверхностного потенциала, в частности, поверхностного электретного потенциала $U_{\dot{y}}$ бесконтактным способом, слабых постоянных токов (десятки пА).

Для измерения напряжения на конденсаторе С и высокоомном резисторе R2 с известными емкостью и сопротивлением используется полевой

МДП - транзистор со встроенным каналом, имеющий входное сопротивление затвор – исток 10^{12} - 10^{14} Ом. Величина изменяемого сопротивления транзистора сток – исток является выходным сигналом и используется, например, в качестве одного из плеч моста Уитстона. О величине и полярности напряжения затвор – исток в этом случае судят по показаниям миллиамперметра.

В режиме измерения сопротивлений и емкостей МДС ключи K2 и K4 включаются в положения 1, ключ K5 – разомкнут. При замыкании ключа K1 переходные процессы, перераспределения ЭП между исследуемым образцом $C_{i\dot{a}\dot{o}}$ и входом транзистора приводят к изменению измеряемого на входе транзистора напряжения $U_{\dot{o}\dot{o}}$ (напряжения затвор – исток) с течением времени:

$$U_{\dot{o}\dot{o}} = U \left\{ 1 - \left[\left(\frac{C}{\tilde{N} + \tilde{N}_{i\dot{a}\dot{o}}} - \frac{R_{i\dot{a}\dot{o}}}{R_{\dot{o}\dot{o}} + R_{i\dot{a}\dot{o}}} \right) \cdot \exp \left(- \frac{t(R_{\dot{o}\dot{o}} + R_{i\dot{a}\dot{o}})}{(\tilde{N} + \tilde{N}_{i\dot{a}\dot{o}})R_{\dot{o}\dot{o}}R_{i\dot{a}\dot{o}}} \right) + \frac{R_{i\dot{a}\dot{o}}}{R_{\dot{o}\dot{o}} + R_{i\dot{a}\dot{o}}} \right] \right\},$$

где U – напряжение регулируемого источника напряжения, $U_{i\dot{a}\dot{o}}$ - напряжение на исследуемом образце, $R_{i\dot{a}\dot{o}}$ - электрическое сопротивление образца, $R_{\dot{o}\dot{o}}$ - электрическое входное сопротивление транзистора, C - ёмкость эталонного конденсатора с малыми токами утечки вместе с входной емкостью транзистора (последняя обычно пренебрежимо мала). Из приведенного выражения, записываемого для двух моментов времени t_1 и t_2 как системы из двух уравнений, определяются параметры образца - $R_{i\dot{a}\dot{o}}$ и $\tilde{N}_{i\dot{a}\dot{o}}$ (и пересчетом - удельное сопротивление и диэлектрическая проницаемость) в постоянном ЭП. Несмотря на наличие переходного процесса, ЭП в образце можно считать, практически, постоянным, т.к. величина входного напряжения на транзисторе при измерениях составляет обычно десятые доли Вольта, а напряжение регулируемого источника напряжения десятки Вольт, т.е. $U_{i\dot{a}\dot{o}} \approx U$.

В режиме измерения $U_{\dot{y}}$ ключ K2 – в положении 2, ключ K4 – в положении 1, ключ K5 – разомкнут, ключ K1 – замкнут и $U = 0$. Под действием ЭП электризованного

диэлектрика, подносимого к затвору полевого транзистора изменяется потенциал затвора и, следовательно, сопротивление исток-сток транзистора. В результате в диагонали предварительно уравновешенного моста появляется электрический сигнал. Постоянная времени переходного процесса вследствие высокоомности используемых материалов при измерении $U_{\dot{\gamma}}$ оказывается на порядки величины больше времени, необходимого для проведения измерения. Поэтому, подавая на измерительный электрод с регулируемого источника постоянного напряжения компенсирующий потенциал соответствующей полярности, и измеряя поданное напряжение, можно скомпенсировать разбаланс моста и по значению поданного напряжения получить величину и знак поверхностного потенциала диэлектрика. Разработанный метод и реализующая его схема значительно удобней для практического использования, чем широко применяемый в настоящее время метод вибрирующего электрода для измерения поверхностного потенциала электрета: отсутствуют механические движущиеся элементы, измерительное устройство компактно, может питаться от батареек, не дорого в изготовлении, и как показало его практическое использование в НПК «Экофлон», позволяет значительно сократить время исследований при многократных измерениях $U_{\dot{\gamma}}$.

В режиме измерения слабых токов (десятки пА) и больших сопротивлений (по найденным значениям токов) ключ К2 – в положении 1, К4 – в положении 2, ключ К5 – разомкнут. Искомые токи находятся как отношение измеренного напряжения на входе транзистора к величине соответствующего сопротивления, подключенного входу транзистора.

Для использования предлагаемых методов и измерительного устройства разработаны программа и интерфейс для работы с ней, в которых осуществляется расчет искомых величин и погрешностей их косвенных измерений [2].

С использованием разработанных средств был выполнен ряд новых исследований по измерению характеристик МДС в постоянном ЭП, а также показана принципиальная возможность диагностики ряда электрофизических параметров материалов и изделий. Некоторые примеры приведены ниже.

1. Контроль качества электретов из гидрофобизированного диоксида кремния.
2. Измерение характеристик оксидных конденсаторов для отбраковки потенциально ненадежных образцов.
3. Измерение статической диэлектрической проницаемости для неразрушающего контроля прочности керамики.
4. Измерение концентрации ионов в газе.
5. Диагностика коррозии металла.
6. Измерение относительной влажности.
7. Диагностика дефектности защитного диэлектрического покрытия.

Таким образом, разработанный прибор может использоваться для контроля широкого круга характеристик природной среды, материалов и изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Е.К., Пщелко Н.С. Диагностика потенциально опасных дефектов в диэлектрических материалах // Записки Горного института. - 2012, т.196, с. 311 - 315.
2. Акчурина Т.Р., Пщелко Н.С., Буевич В.В. Программное обеспечение для контроля параметров емкостных структур на основе использования силового действия электростатического поля // Записки Горного института. - 2012, т.196, с. 289 - 295.