УДК 621.3.028.3

Н.С.ПЩЕЛКО
доцент кафедры общей и технической физики
И.И.ПАВЛИКОВ
Геолого-разведочный факультет, группа РТ-03, ассистент профессора

ДИАГНОСТИКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Основными электрическими характеристиками диэлектрических материалов и изделий из них являются их электрические емкость и сопротивление. Целью работы была разработка экспресс-методики и недорогого, мобильного устройства для измерения этих параметров высокоомных материалов на постоянном напряжении. Принцип работы устройства основан на использовании переходных процессов в последовательно соединенных элементах, имеющих электрические емкость и сопротивление. В электрической схеме устройства используется МДП-транзистор с большим входным сопротивлением.

Устройство может быть использовано для оценки контролируемой, специально созданной пористости диэлектрических материалов; измерения влажности древесины, бетона и других пористых сыпучих материалов; выявления примесей в малых количествах в особо чистых веществах; выявления кристаллографической ориентации монокристаллов и др.

The basic electric characteristics of dielectric materials and products from them are their electric capacitance and resistance. The purpose of work was development of an express train – technique and the inexpensive, mobile device for measurement of these parameters of high-resistance materials on a constant voltage. The principle of work of the device is based on use of transients in connected in sereies elements having electric capacity and resistance. In the electric circuit of the device the MOSFET with high entrance resistance is used.

Applications of the device are possible for: estimations of the controllable, specially created porosity of dielectric materials; measurements of humidity of wood, concrete and other porous, loose materials; revealings of impurity in small quantities in especially pure substances; revealing crystal orientations of monocrystals, etc.

Контроль качества продукции заключается в проверке соответствия ее качества установленным требованиям. Важными критериями качества покрытий на металле являются геометрические показатели, а также технологические признаки качества (например, отсутствие недопустимых дефектов типа нарушения сплошности). В производстве широко применяют неразрушающий контроль, позволяющий проверить качество продукции без нарушения ее годности к использованию по назначению. При этом особая роль в повышении эффективности производства и улучшения качества продукции отводится автоматическим средствам измерения.

Актуальной и требующей скорейшего разрешения является проблема контроля толщины многослойных покрытий в процессе их нанесения и финишного контроля результатов этого процесса. Большое внимание придается скорости сканирования относительно больших по площади поверхностей с высокой разрешающей способностью локальных измерений. Например, производство композиционных материалов и контроль качества готовой продукции требует измерения толщины слоя неоднородного по составу фторопластового покрытия, применяемого в технологиях пищевой промышленности.

Широкий спектр материалов и покрытий приводит к необходимости применения специализированных приборов и сложных методик контроля толщины их слоя. Многие из известных методов измерения толщины

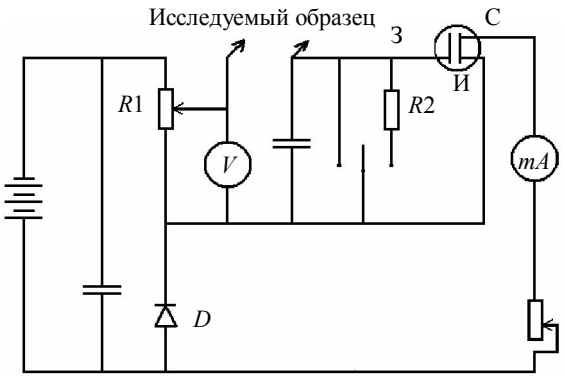


Рис.1.Электрическая схема измерителя емкости и сопротивления высокоомных материалов

диэлектрических покрытий чувствительны к изменению ряда неконтролируемых параметров. Например, диэлектрическая и магнитная проницаемости могут изменяться в процессе сушки и затвердевания слоя.

Все эти соображения определяют актуальность проведения исследований и разработок методов и устройств измерения толщины и качества слоя диэлектрических покрытий, а также экономическое обоснование их технической реализуемости.

Электрические емкость и сопротивление – основные характеристики диэлектриков. Известны различные методы их измерения: емкость измеряют, в основном, на переменном напряжении с помощью мостов переменного тока, а высокие сопротивления – с помощью тераомметров. Однако в большинстве случаев рабочее напряжение тераомметров составляет несколько сотен вольт, что не всегда допустимо (особенно в случае тонких покрытий). К тому же стоимость тераомметров достаточно высока – около 100 тыс. руб. В ряде случаев могут применяться косвенные методы измерения рассматриваемых параметров. В большинстве случаев существующие методы и приборы достаточно дороги и не мобильны. К тому же иногда необходимо определять нужные параметры материала на постоянном напряжении.

Целью работы была разработка экспресс-методики и устройства для измерения толщины диэлектрических покрытий и выявления их дефектности, основанных на использовании переходного процесса в последовательно соединенных конденсаторах. В начальный момент времени при подаче напряжения на последовательно соединенные конденсаторы напряжение на них установится в соответствии со значениями их емкостей, а через некоторое время в соответствии со значениями их сопротивлений. Для измерения напряжения на образце предложено использовать один из полевых МДП-транзисторов, имеющих исключительно малые токи утечки (менее 0,001 нА) по входу (затвор – исток)*, что при рабочих напряжениях в несколько десятков вольт соответствует входному сопротивлению 10^{12}-10^{13} Ом. Такое большое сопротивление позволяет, измеряя напряжение на входе транзистора, определять емкость и сопротивление образца, включенного последовательно с входным электродом (затвором) транзистора. При этом о напряжении на входе транзистора можно судить по току в цепи исток – сток транзистора. Электрическое напряжение на исследуемый образец, соединенный последовательно со входом (затвором З) транзистора, подается введением потенциометра R1 в нужное положение, при этом напряжение питания схемы контролируется по вольтметру V (рис.1). Переходные процессы, связанные с перераспределением напряжений между образцом и входом транзистора, описываются системой уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{U_{\text{îáð}}}{R_{\text{îáð}}} + C_{\text{îáð}}\dfrac{dU_{\text{îáð}}}{dt} = \dfrac{U_{\text{òð}}}{R_{\text{òð}}} + C\dfrac{dU_{\text{òð}}}{dt}; \\ U_{\text{îáð}} + U_{\text{òð}} = U, \end{cases}$$

где U – напряжение питания схемы; $U_{\text{обр}}$ – напряжение на исследуемом образце; $U_{\text{тр}}$ – напряжение на транзисторе; $R_{\text{обр}}$ и $R_{\text{тр}}$ – электрическое сопротивление образца и транзистора соответственно; C – емкость конденсатора с малыми токами утечки и известной емкости.

* Транзисторы: Справочник / О.П.Григорьев, В.Я.Замятин, Б.В.Кондратьев, С.Л.Пожидаев. М.: Радио и связь, 1989. 272 с.

В начальный момент времени (при $t = 0$) напряжение в измерительной схеме распределяется по емкостям:

$$U_{òð}(0) = \left(1 - \frac{C}{(C + C_{îáð})}\right)U,$$

а напряжение на транзисторе определяется по току стока в соответствии с заранее измеренной статической характеристикой передачи транзистора. Тогда емкость образца, учитывая последовательное соединение образца с конденсатором C,

$$C_{îáð} = \frac{CU_{òð}}{U - U_{òð}},$$

где $U_{тр}$ – напряжение на входе полевого транзистора, измеренное по величине тока стока транзистора сразу после включения схемы.

Если переходный процесс протекает быстро, то это напряжение можно найти путем экстраполяции зависимости $U_{тр}(t)$ к начальному моменту времени.

По окончании переходного процесса (при $t = \infty$) напряжения распределяются по сопротивлениям:

$$U_{òð}(\infty) = \left(1 - \frac{R_{îáð}}{(R_{îáð} + R_{òð})}\right)U.$$

Тогда сопротивление образца

$$R_{îáð} = \frac{R_{òð}(U - U_{òð})}{U_{òð}},$$

где $U_{тр}$ – напряжение на входе полевого транзистора, измеренное по окончанию переходного процесса.

Как следует из указанной выше системы уравнений, переходный процесс для высокоомных материалов может быть достаточно длительным (рис.2). В частности, изменение во времени измеряемого на входе транзистора напряжения описывается выражением

$$U_{òð} = \left(U - \left[\left(\frac{C}{\tilde{N} + \tilde{N}_{îáð}} - \frac{R_{îáð}}{R_{òð} + R_{îáð}}\right)\times\right.\right.$$

$$\left.\left.\times \exp\left(-\frac{t(R_{òð} + R_{îáð})}{(\tilde{N} + \tilde{N}_{îáð})R_{òð}R_{îáð}}\right) + \frac{R_{îáð}}{R_{òð} + R_{îáð}}\right]U\right).$$

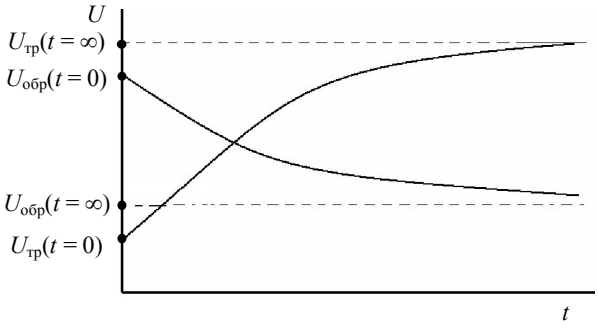


Рис.2. Переходные процессы в образце при помещении его в электрическое поле

Приведенное выражение зависимости напряжения на входе транзистора от времени позволяет найти сопротивление образца, не дожидаясь окончания длительного переходного процесса: зная емкость образца, определенную в начале переходного процесса и фиксируя напряжение на входе транзистора в некоторый момент времени t, искомую величину сопротивления образца $R_{обр}$ можно найти из приведенного выражения численными методами.

Поскольку входное сопротивление транзистора $R_{тр}$ – ненормируемая величина, которая к тому же зависит от условий измерения (например, от окружающей температуры), его значение необходимо заранее определить. Это можно сделать, зарядив емкость C до некоторого напряжения и наблюдая сравнительно небольшой фрагмент в течение времени Δt достаточно длительного процесса ее разрядки через входное сопротивление транзистора. Можно показать, что сопротивление транзистора

$$R_{òð} = \frac{\Delta t}{\tilde{N} \ln \frac{u_1}{u_2}},$$

где Δt – интервал времени, соответствующий изменению напряжения на транзисторе от значения u_1 до u_2.

В качестве примера возможного применения разработанного устройства в настоящей работе исследовались фторопластовые и алюмооксидные покрытия на металлической посуде. Поскольку методика должна быть реализована в виде дешевого и

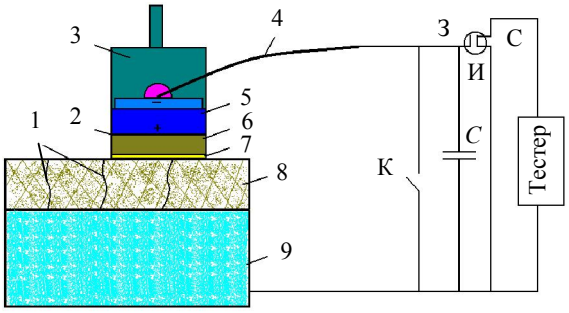


Рис.3. Методика контроля диэлектрических покрытий электростатическими методом

мобильного прибора (рис.3), роль источника питания в цепи затвора выполняет плоская, миниатюрная, круглая батарейка 5 к которой с помощью контактола 2 снизу подклеена проводящая резинка 6, а сверху – гибкая, достаточно упругая медная проволока 4. Таким образом, батарейка с проводящей резинкой дополнительно выполняет функцию плоского измерительного электрода известной площади. В качестве источника питания цепи исток – сток используется тестер, включенный в режим измерения сопротивления, и выполняющий таким образом одновременно две функции: источника питания и конечного измерительного устройства.

В режиме исследования дефектности покрытия под проводящую резинку подкладывается влажная бумага 7 соответствующей площади. Измерительный электрод (батарейка) помещается на исследуемую поверхность с помощью диэлектрической ручки 3. Тогда при наличии дефекта 1 в измеряемом месте покрытия 8 на металлическом основании 9 за счет капиллярного втягивания влаги дефектом положительный полюс батарейки оказывается соединен фактически накоротко с истоком транзистора, так как его входное сопротивление значительно больше сопротивления смоченного дефекта. При этом к затвору транзистора оказывается приложенным отрицательный потенциал батарейки; транзистор практически полностью закрывается, так как сопротивление сток – исток (С – И) становится очень большим, что фиксируется тестером. В режиме измерения толщины покрытия батарейка с резинкой располагаются непосредственно на поверхности (без влажной бумаги). В этом случае напряжение батарейки приложено к последовательно соединенным емкости диэлектрика покрытия ($C_{обр}$) и конденсатору известной емкости C, включенным между затвором и истоком транзистора. Поэтому напряжение затвор – исток (З – И) будет зависеть в частности от значения емкости образца. Потенциал затвор – исток транзистора определяет значение сток – исток. Таким образом, по показаниям тестера можно судить о емкости образца и, следовательно, его толщине.

Если показания тестера начинают расти, то это указывает на наличие относительно высокой проводимости диэлектрика покрытия на данном участке, т.е. возможные локальные отклонения химического состава или наличие дефекта структуры покрытия.