УДК 666.1.037.5

Н.С.ПЩЕЛКО, *д-р техн. наук, профессор, nikolsp@mail.ru*
А.С.ПОЛЛЬ, *студент, anton-poll@yandex.ru*
Д.О.РЕПЕТУХ, *студент, repetuh_d_o@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

N.S.PSHCHELKO, *Dr. in eng. sc., professor, nikolsp@mail.ru*
A.S.POLL, *student, anton-poll@yandex.ru*
D.O.REPETUH, *student, repetuh_d_o@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Предложено устройство для измерения на постоянном напряжении основных электрических характеристик высокоомных диэлектрических материалов и изделий из них – электрической емкости и сопротивления. 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. Рассмотрены возможности практического применения устройства для измерения поверхностного потенциала электретов, отбраковки потенциально ненадежных конденсаторов, диагностики коррозии металла под защитным диэлектрическим покрытием и др.

Ключевые слова: электрическое поле, измерение электрической емкости и сопротивления, МДП-транзистор, электрет, диагностика.

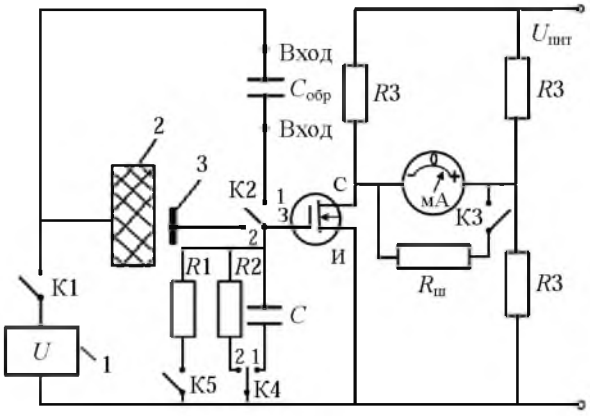
USE OF ELECTRIC FIELDS FOR THE CONTROL OF METAL-DIELECTRIC STRUCTURES

In this work a device for measurement at a constant voltage of the basic electric characteristics of high-resistance dielectric materials and products from them – their electric capacitance and resistance – is developed. 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.

Possibilities of practical use of the device for measurement of surface electret potential, for rejection of potentially unreliable condensers, for diagnostics of corrosion of metal under a protective dielectric covering are considered, etc.

Key words: electric field, measurement of electric capacitance and resistance, MOSFET, electret, diagnostics.

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 1 мин) 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, так как не позволяют отсле-



Измерительное устройство для определения комплекса статических характеристик диэлектрических материалов

1 – регулируемый источник постоянного напряжения; 2 – электрет; 3 – измерительный электрод З – затвор, И – исток, С – сток

живать медленно протекающие процессы. Это заставляет искать новые подходы и электрофизические методы неразрушающего контроля.

Измерение низкочастотных и статических электрических характеристик изучаемых диэлектриков необходимо проводить в слабых электрических полях, так как они наиболее чувствительны к потенциально опасной фазовой и структурной неоднородности материала*.

Разработаны методы и устройство (см. рисунок) для измерения комплекса низкочастотных (статических) характеристик диэлектрических материалов: высокого сопротивления (до 10^{13} Ом), электрической емкости (от десятков пикофарад), поверхностного потенциала, в частности, поверхностного электретного потенциала $U_э$ бесконтактным способом, слабых постоянных токов (десятки пикоампер).

Для измерения напряжения на конденсаторе C 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 К2 и К4 включаются в положение 1, ключ К5 – разомкнут. При замыкании ключа К1 переходные процессы, перераспределения электрического поля между исследуемым образцом $C_{обр}$ и входом транзистора приводят к изменению измеряемого на входе транзистора напряжения $U_{тр}$ (напряжения затвор-исток) с течением времени:

$$U_{тр} = U\left\{1 - \left[\left(\frac{C}{C + C_{обр}} - \frac{R_{обр}}{R_{тр} + R_{обр}}\right) \times \right.\right.$$

$$\left.\left. \times \exp\left(-\frac{t(R_{тр} + R_{обр})}{(C + C_{обр}) R_{тр} R_{обр}}\right) + \frac{R_{обр}}{R_{тр} + R_{обр}}\right]\right\},$$

где U – регулируемый источник напряжения; $U_{обр}$ – напряжение на исследуемом образце; $R_{обр}$ – электрическое сопротивление образца, $R_{тр}$ – электрическое входное сопротивление транзистора; C – емкость 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 $R_{обр}$ и $C_{обр}$ (и пересчетом – удельное сопротивление и диэлектрическая проницаемость) в постоянном электрическом поле. Несмотря на наличие переходного процесса, электрическое поле в образце можно считать практически постоянным, так как входное напряжение на транзисторе при измерениях составляет обычно десятые доли вольт, а регулируемый

* *Григорьев Е.К.* Диагностика потенциально опасных дефектов в диэлектрических материалах / Е.К.Григорьев, Н.С.Пщелко // Записки Горного института. 2012. Т.196. С.311-315.

Grigoriev E.K., Pshchelko N.S. Diagnostics of potentially dangerous defects in dielectric materials // The Proceedings of the Mining Institute. 2012. Vol.196. P.311-315.

источник напряжения десятки вольт, т.е. $U_{обр} \approx U$.

В режиме измерения $U_э$ ключ К2 – в положении 2, ключ К4 – в положении 1, ключ К5 – разомкнут, ключ К1 – замкнут и $U = 0$. Под действием электрического поля электризованного диэлектрика, подносимого к затвору полевого транзистора, изменяется потенциал затвора и, следовательно, сопротивление сток-исток транзистора. В результате в диагонали предварительно уравновешенного моста появляется электрический сигнал. Постоянная времени переходного процесса вследствие высокоомности используемых материалов при измерении $U_э$ больше времени, необходимого для проведения измерения. Поэтому, подавая на измерительный электрод с регулируемого источника постоянного напряжения компенсирующий потенциал и измеряя поданное напряжение, можно скомпенсировать разбаланс моста и по значению поданного напряжения получить величину и знак $U_э$. Разработанные 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, недорого в изготовлении, и, как показало его практическое использование в НПК «Экофлон», позволяет значительно сократить время исследований при многократных измерениях $U_э$.

В режиме измерения слабых токов (десятки пикоампер) 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 к 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*.

Была также показана принципиальная возможность более широкого использования разработанного устройства. Приведем некоторые примеры такого использования.

1. *Измерение концентрации ионов в газе*. В процессе использования прибора, (см. рисунок) было достоверно доказано экспериментально, что с его помощью также можно измерить концентрацию ионов в воздухе. Если разместить данный прибор в потоке газа, содержащего ионы одного знака, то с течением времени на измерительном электроде скапливается все больший электрический заряд, приводящий к появлению разности потенциалов на входе транзистора и изменяющий показания миллиамперметра. По полярности возникающего сигнала и времени отклонения показаний миллиамперметра от нулевого до определенного значения (например, на всю шкалу) можно судить о знаке заряда ионов и их концентрации. Данная методика была многократно проверена и показала хорошую воспроизводимость.

2. *Диагностика коррозии металла под защитным покрытием*. С помощью разработанного прибора возможна также диагностика наличия коррозии металла, покрытого непрозрачным защитным диэлектрическим покрытием. Для реализации этих измерений измерительный электрод транзистора должен быть изготовлен из того же материала, что и диагностируемый металл. Если на последнем нет коррозии, между диагностируемым металлом и измерительным электродом не возникает разности потенциалов, и показания миллиамперметра не изменятся. В случае наличия коррозии на диагности-

* *Акчурин Т.Р.* Программное обеспечение для контроля параметров емкостных структур на основе использования силового действия электростатического поля / Т.Р.Акчурин, Н.С.Пщелко, В.В.Буевич // Записки Горного института. 2012. Т.196. С.289-295.

Akchurin T.R., Pshchelko N.S., Buyevich V.V. The software for the control of parameters of capacitor structures on the basis of use of power action of an electrostatic field // The Proceedings of the Mining Institute. 2012. Vol.196. P.289-295.

руемой поверхности исследуемая структура подобна гальваническому элементу – два разнородных проводника разделены электролитом. При этом роль электролита играет влага, находящаяся в порах диэлектрического покрытия. О наличии коррозии можно судить по возникающей электрохимической разности потенциалов. Обычными токовыми методами фиксация этой разности потенциалов невозможна. При использовании полевого транзистора это ограничение снимается. Предлагаемый метод диагностики представляется перспективным при контроле состояния поверхности металлических труб нефте- и газопроводов, покрытых защитным диэлектрическим слоем.

3. *Измерение относительной влажности*. Были также проведены подробные эксперименты, доказывающие возможность измерения относительной влажности воздуха с использованием предлагаемых методов. В этом случае под влиянием влаги изменяется перераспределение напряжения между входным сопротивлением транзистора и, например, поверхностным сопротивлением стекла площадью примерно 1 $см^2$, которое сильно зависит от относительной влажности. По установившимся значениям напряжений (на практике – по характеру переходного процесса) можно судить об относительной влажности. Недостатком этой методики является сильная зависимость результатов измерений от температуры. Однако при точно известной температуре результаты получаются вполне надежными. Рассмотренным способом можно измерять влажность не только воздуха, но и других материалов, например древесины.

4. *Диагностика дефектности защитного диэлектрического покрытия*. При наличии дефекта в измеряемом месте диэлектрического покрытия (трещина, сквозное отверстие малого диаметра), нанесенного на металлическое основание, за счет капиллярного эффекта происходит втягивание влаги дефектом. Поэтому электрическое сопротивление в данном месте на покрытии становится значительно меньше сопротивления покрытия, не содержащего дефектов. Быстрое изменение с течением времени показаний миллиамперметра указывает на наличие относительно высокой проводимости покрытия на данном участке, а следовательно, и сквозного дефекта.

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