

Н.С. ПШЕЛКО, канд. техн. наук, доцент, *nikolsp@mail.ru*
А.С. МУСТАФАЕВ, д-р физ.-мат. наук, профессор, *alexmustafaev@yandex.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

N.S. PSHELKO, PhD in eng. sc., associate professor, *nikolsp@mail.ru*
A.S. MUSTAFAEV, Dr. in phys. and math., professor, *alexmustafaev@yandex.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИКОВ

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.

Рассмотрено также устройство на основе МДП-транзистора для измерения поверхностного потенциала диэлектриков. Использование этого устройства особенно эффективно при измерении поверхностного потенциала электретов. Обсуждены результаты исследования электретов на основе диоксида кремния.

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

USE OF MOSFET FOR THE CONTROL OF DIELECTRIC CHARACTERISTICS

In this work a device for measurement on a constant voltage of the basic electric characteristics of high-resistance dielectric materials and products from – their electric capacitance and resistance – is developed. The principle of work of the device is based on use of transients in connected in series elements having electric capacity and resistance. In the electric circuit of the device the MOSFET with high entrance resistance is used.

The device on the basis of the MOSFET for measurement of surface potential of dielectrics is considered also. Use of this device is especially effective at measurement of electret surface potential. Results of research of electrets on a basis of silicon dioxide are discussed.

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

Важными критериями качества покрытий на металле являются геометрические показатели (толщина), а также технологические признаки качества, например, отсутствие недопустимых дефектов типа нарушения сплошности. Эти показатели в значительной степени определяют, в частности, коррозионную стойкость металлических изделий. Широкий спектр материалов и покрытий требует применения специализированных

приборов и сложных методик контроля толщины их слоя. Многие из известных методов измерения толщины диэлектрических покрытий чувствительны к изменению некоторых неконтролируемых параметров, например диэлектрической и магнитной проницаемости, которые могут изменяться в процессе сушки и затвердевания слоя.

Все это определяет актуальность исследований и разработки методов и устройств

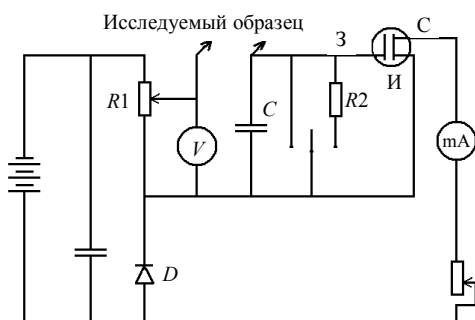


Рис.1. Электрическая схема измерителя емкости и сопротивления высокоомных материалов

З – затвор; С и И – сток и исток транзистора соответственно

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, тераомметры достаточно дороги. Возможны и косвенные методы измерения рассматриваемых параметров,* но и они не решают проблемы. К тому же в некоторых случаях необходимо определять данные параметры материала на постоянном напряжении. Это связано с тем, что под влиянием постоянного электрического поля в материале могут протекать замедленные процессы (например, миграция ионов), которые при использовании переменного поля не заметны. В то же время информация об этих процессах может быть полезной, в частности, может свидетельство-

вать о механических и других неэлектрических характеристиках диэлектрика [1].

Целью работы была разработка экспресс-методик и устройств для измерения толщины диэлектрических покрытий и выявления их дефектности, а также разработка дешевых мобильных устройств для контроля электрического сопротивления, диэлектрической проницаемости и поверхностного потенциала диэлектриков.

Одно из разработанных устройств основано 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 переходного процесса – 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 порядка десятков вольт соответствует входному сопротивлению 10^{12} - 10^{13} Ом [3]. Такое большое сопротивление позволяет, измеряя напряжения на входе транзистора, определять емкость и сопротивление образца, включенного последовательно с входным электродом (затвором) транзистора (рис.1). 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. Переходные процессы, связанные с перераспределением напряжений между образцом и входом транзистора описываются системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{U_{i\partial\delta}}{R_{i\partial\delta}} + C_{i\partial\delta} \frac{dU_{i\partial\delta}}{dt} = \frac{U_{\partial\delta}}{R_{\partial\delta}} + C \frac{dU_{\partial\delta}}{dt}; \\ U_{\partial\delta} + U_{i\partial\delta} = U, \end{cases} \quad (1)$$

* Пат. 2132116 РФ. Н 04 R 29/00. Способ определения качества электретных электроакустических преобразователей и устройство для его реализации / Ф.И.Баталов, Н.С.Пщелко., А.С.Ястребов. Оpubл. 27.05.99. Бюл. № 17. Ч.2.

The patent of the Russian Federation №2132116 Н 04 R 29/00. Way of definition of quality of electret electroacoustic transducers and the device for its realization / F.I.Batalov, N.S.Pshchelko, A.S.Yastrebov. Published on 27.05.99. Bjul. № 17. Part.2.

где U – напряжение питания схемы; $U_{обр}$ – напряжение на исследуемом образце; $U_{тр}$ – напряжение на транзисторе; $R_{обр}$ – электрическое сопротивление образца; $R_{тр}$ – электрическое входное сопротивление транзистора; C – емкость конденсатора с малыми токами утечки вместе с входной емкостью транзистора (последняя обычно пренебрежимо мала).

В начальный момент времени (при $t = 0$) напряжение в измерительной схеме распределяется в соответствии со значениями их емкостей, поэтому

$$C_{i\ddot{o}\ddot{o}} = \frac{CU_{\ddot{o}\ddot{o}}}{U - U_{\ddot{o}\ddot{o}}}, \quad (2)$$

где $U_{\ddot{o}\ddot{o}}$ – напряжение на входе полевого транзистора, измеренное по величине тока стока транзистора сразу после включения схемы, исходя из заранее измеренной статической характеристики передачи транзистора. Если переходный процесс протекает быстро, то это напряжение можно найти экстраполяцией зависимости $U_{\ddot{o}\ddot{o}}(t)$ к началу моменту времени.

По окончании переходного процесса (при $t = \infty$) напряжения распределяются по последовательно соединенным сопротивлениям образца и транзистора, тогда сопротивление образца

$$R_{i\ddot{o}\ddot{o}} = \frac{R_{\ddot{o}\ddot{o}}(U - U_{\ddot{o}\ddot{o}})}{U_{\ddot{o}\ddot{o}}}, \quad (3)$$

где $U_{\ddot{o}\ddot{o}}$ – напряжение на входе полевого транзистора, измеренное по окончании переходного процесса.

Как следует из решения указанной выше системы уравнений (1), переходный процесс для высокоомных материалов может быть достаточно длительным. В частности, изменение во времени измеряемого на входе транзистора напряжения описывается выражением

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

$$\left. \times \exp \left(- \frac{t(R_{\ddot{o}\ddot{o}} + R_{i\ddot{o}\ddot{o}})}{(\tilde{N} + \tilde{N}_{i\ddot{o}\ddot{o}})R_{\ddot{o}\ddot{o}}R_{i\ddot{o}\ddot{o}}} \right) + \frac{R_{i\ddot{o}\ddot{o}}}{R_{\ddot{o}\ddot{o}} + R_{i\ddot{o}\ddot{o}}} \right] U \right). \quad (4)$$

Это выражение позволяет найти сопротивление образца, не дожидаясь окончания переходного процесса: зная емкость образца, определенную в начале переходного процесса по формуле (2) и фиксируя напряжение на входе транзистора в некоторый момент времени t , искомую величину сопротивления образца $R_{i\ddot{o}\ddot{o}}$ можно найти из выражения (4) численными методами относительно неизвестной переменной $R_{i\ddot{o}\ddot{o}}$.

Поскольку входное сопротивление транзистора $R_{\ddot{o}\ddot{o}}$ – ненормируемая величина, к тому же зависящая 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. Так как в данном случае имеем классический экспоненциальный процесс разряда емкости через сопротивление транзистора, то

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

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

В качестве примера применения разработанного устройства исследовались фторопластовые и алюмооксидные покрытия на металлической посуде. В соответствии с формулой для емкости плоского конденсатора толщина покрытия

$$d = \varepsilon \varepsilon_0 S / C_{i\ddot{o}\ddot{o}},$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость пленки; S – площадь измерительного электрода. Предполагается, что ε и S заранее известны, а емкость образца $C_{обр}$ определяется по формуле (2).

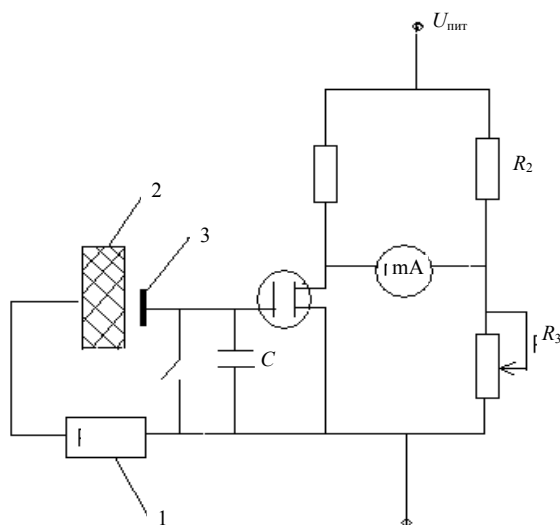


Рис. 2. Схема измерения поверхностного потенциала диэлектрика

1 – регулируемый источник питания; 2 – электризованный диэлектрик; 3 – измерительный электрод полевого транзистора

В режиме исследования дефектности покрытия под электрод, прикладываемый к покрытию, подкладывается влажная бумага соответствующей площади. Измерительный электрод помещается на исследуемую поверхность с помощью диэлектрической ручки. При наличии дефекта (трещины, сквозного отверстия малого диаметра) в измеряемом месте диэлектрического покрытия на металлическом основании за счет капиллярного эффекта наблюдается втягивание влаги дефектом. Поэтому электрическое сопротивление в данном месте на покрытии становится значительно меньше сопротивления покрытия, не содержащего дефектов. Интересно отметить, что появление того же эффекта (хотя и в меньшей степени) возможно и без специального смачивания покрытия влажной бумагой – влага оказывается в дефекте покрытия за счет естественной влажности окружающего воздуха. При малом сопротивлении образца $R_{обр}$ в соответствии с (4) переходный процесс, связанный с изменением напряжения на входе транзистора и изменением показаний миллиамперметра (рис.1), будет быстрым, в отличие от ситуации, когда покрытие не содержит дефектов. Поэтому быстрое убывание с течением времени показаний миллиампер-

метра указывает на наличие относительно высокой проводимости диэлектрика покрытия на данном участке, а следовательно, на возможные локальные отклонения химического состава или сквозной дефект структуры покрытия.

В настоящее время с помощью разработанного устройства проводятся исследования по контролю качества лакокрасочных покрытий. Эти исследования вызывают большой интерес, в частности, при контроле качества покраски автомобилей.

Разработана также установка для измерения бесконтактным способом поверхностного потенциала диэлектрика (рис.2).

Принцип ее работы заключается в следующем. Под действием электрического поля электризованного диэлектрика, подносимого к затвору полевого транзистора, изменяется потенциал затвора и, следовательно сопротивление исток – сток транзистора, включенного в качестве одного из плеч моста Уитстона. В результате в диагонали предварительно уравновешенного моста появляется электрический сигнал. Подавая на компенсирующий электрод с помощью регулируемого источника питания (РИП) компенсирующий потенциал соответствующей полярности и измеряя поданное напряжение, можно скомпенсировать разбаланс моста и по значению поданного напряжения получить величину и знак поверхностного потенциала диэлектрика: поданное напряжение будет равно по модулю и противоположно по знаку поверхностному потенциалу диэлектрика.

Электризуя диэлектрик и затем контролируя спад поверхностного потенциала во времени, можно установить корреляционные зависимости между характером спада и неэлектрическими характеристиками материала.

В качестве примера использования разработанного устройства приведем данные по измерению поверхностного потенциала U_s электретов на основе диоксида кремния SiO_2 . Создание стабильного электрета на основе этого материала является актуальной задачей, так как использование электретов из SiO_2 позволит широко вне-

дрить их в современную стандартную планарную кремниевую технологию изготовления микросхем. Это, в частности, позволило бы создать миниатюрные электретные микрофоны и другие датчики, встроенные непосредственно в микросхему и изготавливаемые одновременно с самой микросхемой в едином технологическом цикле. Пока эта задача окончательно не решена.

Были выполнены следующие исследования по стабильности электретов из SiO_2 .

Измерение стабильности U_s в комнатных условиях для слоев SiO_2 , полученных различными способами. Были исследованы образцы Si-пластин со слоем SiO_2 , полученным термическим и плазмохимическим окислением.

Слои SiO_2 были изготовлены в ряде организаций, в том числе в объединении «Светлана» (г. Санкт-Петербург), в Технологическом центре Московского института электронной техники (г. Зеленоград) и корейской фирмой BSE. На последние из указанных пластин в Центре микроэлектроники и диагностики (ЦМИД) в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (ЛЭТИ) был нанесен слой SiO_2 плазмохимическим методом по технологии, используемой в ЦМИД ЛЭТИ. Кроме этого, были исследованы Si-пластины с двухслойной диэлектрической структурой $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$, причем слои SiO_2 получали термическим окислением, а слои Si_3N_4 – пиролизом.

Все пластины были разрезаны на образцы размером 15×15 мм, затем были сформированы партии образцов с I по XI, причем каждой партии соответствовала конкретная исходная пластина. Электризация образцов осуществлялась по стандартной процедуре в коронном разряде [2]. Образцы электризовали в коронном разряде переменного тока с использованием управляющего сеточного электрода через фторопластовую маску толщиной 40 мкм с окном в форме квадрата со стороной 8 мм. Напряжение сетки U_c , определяющее значение потенциала, до которого заряжается

поверхность образца, было отрицательным и составляло 300 В.

Контроль поверхностного потенциала U_s проводился с помощью разработанного устройства с подачей компенсирующего напряжения. Диаметр измерительного электрода 5 мм. Относительная погрешность измерения на установке не превышает 3 %.

На первом этапе было электризовано определенное количество образцов из каждой партии до заданного начального значения U_{s0} . Была исследована стабильность U_s в зависимости от времени хранения образцов в нормальных лабораторных условиях (20°C и относительная влажность ниже 65 %) и выделены партии образцов, обнаруживших достаточно хорошую стабильность U_s в комнатных условиях хранения. Наилучшие результаты были получены для следующих партий: I – термический оксид («Светлана»); IV – плазмохимический оксид (ТЦ); V – плазмохимический оксид (ТЦ); VII – термический оксид (ТЦ); VIII – двухслойная структура $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$ («Светлана»).

Данные по спаду U_s для перечисленных партий приведены в табл.1. В этой же таблице приведены для сравнения данные по спаду потенциала для образцов из партии VI (плазмохимический оксид SiO_2 , нанесенный в ЦМИД на Si-пластины фирмы BSE). Очевидно, что образцы партии VI продемонстрировали неудовлетворительную стабильность U_s , что, по нашему мнению, объясняется несовершенством методики плазмохимического получения слоев SiO_2 , используемой в ЦМИД ЛЭТИ.

Из полученных данных видно, что реальный практический интерес представляет SiO_2 , полученный термическим окислением по технологии ТЦ.

Выбор гидрофобизаторов и отработка режимов их нанесения. Диоксид кремния является полярным материалом, склонным к накоплению пленки влаги на своей поверхности. Наличие этой пленки ведет к разрядке электрета. Поэтому для повышения стабильности заряда электретов на основе SiO_2 их необходимо покрывать гидрофобизаторами – гидрофобными материалами.

Таблица 1

Релаксация поверхностного потенциала электретов U_s на основе диоксида кремния, изготовленного по различным технологиям при хранении в комнатных условиях

Партия	Образец	U_c , В	U_{s0} , В	U_s при времени хранения, В						
				2 ч	1 сут	2 сут	3 сут	5 сут	6 сут	7 сут
I	I – 1	–280	–270	–256	–232	–230	–214	–207	–209	–209
	I – 2		–260	–246	–242	–238	–234	–234	–228	–227
IV	IV – 1	–255	–257	–200	–204	–201	–203	–195	–187	–188
	IV – 2		–257	–228	–227	–223	–221	–215	–202	–200
V	V – 1	–255	–256	–252	–252	–252	–250	–250	–253	–250
	V – 2		–256	–232	–208	–195	–197	–185	–185	–185
VII	VII – 1	–280	–280	–282	–282	–280	–280	–282	–280	–281
	VII – 2		–280	–279	–283	–280	–279	–283	–285	–284
VIII	VIII – 1	–300	–298	–	–286	–279	–278			
	VIII – 2		–296	–	–292	–290	–285			
VI	VI – 1	–185	–81	–40	–24	–16	–16	–13	–13	
	VI – 2		–105	–47	–28	–23	–17	–17	–17	
	VI – 3	–250	–70	–	–20	–14	–12	–9		
	VI – 4	–150	–76	–41	–22	–16	–15	–15	–13	

Таблица 2

Релаксация поверхностного потенциала электретов на основе диоксида кремния, изготовленного по различным технологиям при хранении в условиях повышенной влажности ($U_c = -300$ В)

№ п/п	Партия	Номер образца	U_{s0} , В	U_s при времени хранения (сут), В				
				1	3	4	5	6
1	VII – ДМДХС	VII – 1	–303	–297	–292	–289	–290	–285
2		VII – 2	–299	–297	–296	–297	–296	–295
3	VII – ГМДС	VII – 3	–300	–300	–287	–285	–285	–285
4		VII – 4	–298	–300	–295	–294	–295	–293
5	IV – ГМДС	IV – 1	–298	–225	–147	–111		
6		IV – 2	–298	–290	–264	–260		
7		IV – 3	–298	–269	–260	–248		
8		IV – 4	–300	–192	–77	–61		
9		IV – 5	–295	–275	–268	–263	–260	–261

На втором этапе обрабатывалась процедура нанесения различных видов гидрофобизатора. Испытывались гидрофобизаторы ГМДС (гексаметилдисилазан) и ДМДХС (диметилдихлорсилан). Оба гидрофобизатора были нанесены на образцы партии VII. На образцы партии IV наносился только ГМДС при различных

углах смачивания гидрофобизирующей жидкости.

Испытание наиболее перспективных образцов при повышенной влажности. Образцы были помещены в камеру влаги с относительной влажностью 95-98 % при температуре $T = 20$ °С. Результаты испытаний (табл.2) показали, что примерно оди-

наковая и высокая стабильность во влаге (за время выдержки 6 сут) достигнута на образцах термического оксида, изготовленного в ТЦ (г. Зеленоград), гидрофобизированного ГМДС и ДМДХС. При этом следует отметить, что уровень электретного потенциала, использованный в испытаниях, существенно превышает значения U_3 , используемые в реальных конструкциях электретных микрофонов, а известно, что для меньших уровней U_3 стабильность потенциала при прочих равных условиях выше [2]. Это указывает на возможность создания стабильного электрета на основе диоксида кремния и на необходимость проведения дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ганибалов А.А. Комплексное исследование диэлектрических и физико-механических свойств реальных керамических микроизделий / А.А.Ганибалов, Г.М.Марчук, Н.С.Пщелко, В.Н.Рудаков, А.А.Самодуров // Дефектоскопия. 1989. № 7.
2. Григорьев О.П. Транзисторы: Справочник / О.П.Григорьев, В.Я.Замятин, Б.В.Кондратьев, С.Л.Пожидаев. М., 1989.
3. Зесслер Г.М. Электреты. М., 1983.

REFERENCES

1. Ganibalov A.A., Marchuk G.M., Pshchelko N.S., Rudakov V.N., Samodurov A.A. Complex research of dielectric and physicomachanical properties of real ceramic microproducts // Defektoskopiya. 1989. № 7.
2. Grigoriev O.P., Zamyatin V.J., Kondratyev B.V., Pozhidaev S.L. Transistors: the Directory. Moscow, 1989.
3. Zessler G.M. Electrets. Moscow, 1983.