

Особенности определения сопротивления и диэлектрической проницаемости высокоомных материалов

С. А. Иванова¹, Д. А. Козодаев², Н. С. Пщелко³

^{1,3}Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²ООО «Активная фотоника», Москва

¹Soncha.ivanova@gmail.com, ²kozodaev@gmail.com, ³nikolsp@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена работа программы по определению диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления высокоомных материалов. Выявлены оптимальные промежутки времени для проведения измерений с заданной точностью. Предложена экспресс-методика для оценки отклонений сопротивления утечки конденсаторов от стандартного значения.

Ключевые слова: высокоомные материалы; конденсаторы; диэлектрическая проницаемость; программа; сопротивление утечки; экспресс-методика

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изделия из высокоомных диэлектриков используются повсеместно, в частности, в космических аппаратах и трубопроводах, в устройствах микро-и нанoeлектроники и др [1-4]. Контроль качества диэлектрических материалов осуществляется с использованием различных методов, особую роль среди которых, ввиду относительной простоты их реализации, играют методы с использованием электрического поля [5–8].

Известны различные методы измерения основных характеристик диэлектриков: ёмкость 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). Таким образом, используются сравнительно сильные электрические поля, а в [6] было показано, что измерения целесообразно проводить в слабых полях. К тому же, стоимость тераомметров достаточно высока. В ряде случаев могут применяться косвенные методы измерения рассматриваемых параметров. Однако, существующие методы и приборы в большинстве случаев достаточно дороги и немобильны. В некоторых случаях существует необходимость определения данных параметров 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. При этом информация об этих медленно протекающих процессах может косвенно свидетельствовать о механических дефектах и других неэлектрических характеристиках диэлектрика.

На сегодняшний день уже разработаны методы и программное обеспечение, позволяющее вычислить диэлектрическую проницаемость и сопротивление высокоомных проводников в постоянном электрическом поле [9], что является более информативным, чем традиционные измерения мостами переменного тока [6].

Целью настоящей работы является определение оптимального временного промежутка, необходимого для достаточно точного измерения диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления высокоомных материалов на основе разработанного в [6, 9] метода.

II. ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТРОЙСТВА

Разработанное в [6, 9] устройство основано на использовании переходного процесса в последовательно соединённых конденсаторах. В начальный момент времени при подаче напряжения на последовательно соединённые конденсаторы напряжение на них установится в соответствии со значениями их ёмкостей, а через некоторое время переходного процесса – в соответствии со значениями их сопротивлений. Использование транзистора с большим входным сопротивлением, позволяет, путём измерения напряжения на входе транзистора, определять ёмкость и сопротивление образца, включённого последовательно с входным электродом (затвором) транзистора. При этом о напряжении на входе транзистора можно судить по току в цепи исток-сток транзистора, рис. 1.

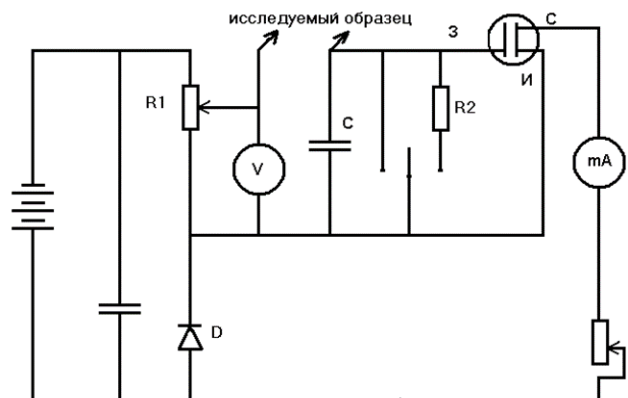


Рис. 1. Электрическая схема измерителя ёмкости и сопротивления высокоомных материалов

Переходные процессы, связанные с перераспределением напряжений между образцом и входом транзистора, описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{U_{обр}}{R_{обр}} + C_{обр} \frac{dU_{обр}}{dt} = \frac{U_{тр}}{R_{тр}} + C \frac{dU_{тр}}{dt} \\ U_{тр} + U_{обр} = U, \end{cases} \quad (1)$$

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 вместе с сопротивлением параллельно подключенного к нему конденсатора C . При этом C – ёмкость конденсатора с малыми токами утечки вместе с входной емкостью транзистора (последняя обычно пренебрежимо мала).

Поскольку входное сопротивление $R_{тр}$ – ненормируемая величина, которая к тому же зависит от условий измерения (например, от окружающей температуры), его значение необходимо заранее определить. Под $R_{тр}$ понимается, как уже отмечалось, результирующее сопротивление, определяемое не только входным сопротивлением самого транзистора, но также и сопротивлением утечки конденсатора C . Величину $R_{тр}$ можно определить, зарядив ёмкость C до некоторого напряжения и наблюдать относительно небольшой фрагмент в течение времени Δt достаточно длительного процесса её разрядки через входное сопротивление транзистора и собственное сопротивление конденсатора. Учитывая, что в данном случае наблюдается классический экспоненциальный процесс разряда емкости, последняя величина может быть вычислена по формуле

$$R_{тр} = \frac{\Delta t}{C \cdot \ln \frac{u_1}{u_2}},$$

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

Из решения указанной выше системы уравнений (1) следует, переходный процесс для высокоомных материалов может быть достаточно длительным. Изменение во время измеряемого на входе транзистора напряжения описывается выражением

$$U_{тр} = \left(U - \left[\left(\frac{C}{C+C_{обр}} - \frac{R_{обр}}{R_{тр}+R_{обр}} \right) \cdot \exp \left(- \frac{t(R_{тр}+R_{обр})}{(C+C_{обр})R_{тр}R_{обр}} \right) + \frac{R_{обр}}{R_{тр}+R_{обр}} \right] U \right) \quad (2)$$

Приведённое выражение зависимости напряжения на входе транзистора от времени позволяет найти сопротивление образца и его емкость, не дожидаясь окончания переходного процесса: для этого достаточно измерить значения $U_{тр}$ в два различных момента времени t_1 и t_2 . Тогда, решая соответствующую систему уравнений из двух уравнений, можно определить две неизвестных – $C_{обр}$ и $R_{обр}$. Зная ёмкость образца, на основе формулы плоского конденсатора $C_{обр} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ (S – площадь образца, d – его толщина), можно рассчитать значение диэлектрической проницаемости. Для выполнения рассмотренных операций использовалось разработанное нами программное обеспечение [9], рис. 2.

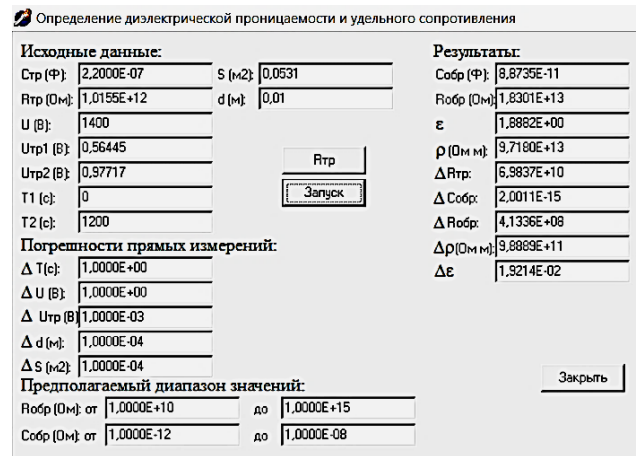


Рис. 2. Экранная форма интерфейса для определения диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления высокоомных материалов

III. ПРОВЕДЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Представляет интерес выяснить продолжительность времени измерения $t_2 - t_1 = T_2 - T_1$ (рис. 2), которая позволяет получить достоверные результаты измерений. Анализ этого вопроса показал, что искомое время сильно зависит от характера протекания переходного процесса.

Из (2) видно, что постоянная времени переходного процесса

$$\tau = \frac{(C+C_{обр})R_{тр}R_{обр}}{R_{тр}+R_{обр}}. \quad (3)$$

В реальных ситуациях, подобных показанной на рис. 2, для того чтобы большая часть из приложенного напряжения падала на образец и в процессе измерений относительное изменение этого напряжения было невелико, выбирают

$$C \gg C_{обр}. \quad (4)$$

Несмотря на наличие переходного процесса, электрическое поле, в котором находится образец, 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. $U_{обр} \approx U$. Кроме того, при указанном соотношении влияние помех на результат измерений оказывается наименьшим – помехи не могут существенно изменить относительную величину заряда конденсатора большой емкости, а значит и напряжение на нем. Следует отметить, что выбор, указанный в (4), однако, сильно увеличивает время переходного процесса. Поэтому в случаях, когда по каким-то причинам, есть необходимость наблюдать перераспределение напряжений в конце переходного процесса, есть смысл пожертвовать рассмотренными выше преимуществами выбора $C \gg C_{обр}$ в пользу уменьшения времени переходного процесса.

На рис. 2 под $C_{тр}$ подразумевается указанная выше величина C – напомним, что это ёмкость эталонного конденсатора с малыми токами утечки вместе с входной емкостью транзистора. При указанных на рис. 2 значениях величин в соответствии с (3) получается $\tau = 2,13 \cdot 10^5$ с. Как уже указывалось, для измерений вовсе не обязательно дожидаться окончания переходного

процесса. Современные цифровые измерительные приборы позволяют надежно зафиксировать получаемые при измерениях значения напряжения в текущий момент времени. Особенностью измерений по предлагаемой методике является то, что критерием, позволяющим, не дожидаясь окончания переходного процесса снимать показания $U_{тр2}$, является не время, сопоставимое с τ , а замедление изменения во времени измеряемых напряжений до такой степени, что эти значения могут быть надежно измерены. Действительно, при определенных (и вполне реальных) значениях величин, стоящих в круглых скобках перед экспонентой в (2) этот предэкспоненциальный множитель, может оказаться равен нулю. В этом случае измеряемое напряжение вообще не будет меняться, и нет смысла выжидать длительное время перед снятием показаний. Таким образом, необходимое время измерений определяется не столько значением τ , сколько тем насколько надежно могут быть измерены изменяющееся во времени значение $U_{тр2}$ и $U_{тр1}$. Также на достоверность получаемых результатов влияет точность численных вычислений, заложенная в программе. Она достаточна высока, поэтому, главным образом, возникает вопрос о влиянии точности приборных измерений на искомые величины. Рассмотрим это влияние на примере, определения сопротивления образца $R_{обр}$. Конечно, эта точность будет зависеть от конкретных значений величин, используемых в измерениях и расчетах. Поэтому проведем лишь оценку рассматриваемой ситуации на примере данных из рис. 2. Ниже приведены результаты расчета $R_{обр}$ при различном числе значащих знаков, используемых в расчетах

ТАБЛИЦА I. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА $R_{обр}$ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЧИСЛЕ ЗНАЧАЩИХ ЗНАКОВ

$U_{тр1}, В$	0,56445	0,5644	0,564	0,56	0,5
$U_{тр2}, В$	0,97717	0,9771	0,977	0,97	0,9
$R_{обр} \cdot 10^{-13} Ом$	1,830	1,830	1,829	1,842	1,890

Как видно из данных табл. 1 и рис. 2, при времени измерения 1200 с, что на 2 порядка, меньше рассчитанного выше времени переходного процесса τ , оказывается достаточно 3-х – 4-х значащих цифр при измерениях для получения надежного результата. Подобные измерения могут быть выполнены обычным мультиметром.

На основе рассмотренного выше можно предложить экспресс-методику для выявления отклонений сопротивления изоляции конденсаторов от стандартного значения. Рассмотрим ее кратко на примере конденсаторов одинаковой емкости, соединенных последовательно. В первый момент после включения питания напряжения на них распределяются обратно пропорционально их емкостям, т. е. будут приблизительно равны. В дальнейшем напряжения будут стремиться распределиться пропорционально сопротивлениям конденсаторов. Поэтому на одном из них напряжение начнет возрастать, а на другом – убывать. Для исключения влияния измерительных приборов на некоторое время подключенные к питанию конденсаторы надо оставить предоставленными самим себе, а затем прямыми измерениями определить на каком из них напряжение возросло, а на каком упало. После

этого легко сделать вывод о сопротивлениях утечки конденсаторов. Конечно, в качестве измерительного прибора при этом не всегда можно использовать мультиметр – прибор не должен заметно изменять заряд конденсатора за время измерений.

Более подробное рассмотрение предлагаемой методики и ее техническая реализация намечены в качестве перспектив продолжения настоящей работы.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- Необходимое время для реализации рассмотренного способа измерений определяется не столько постоянной времени переходного процесса, сколько замедление изменения во времени измеряемых напряжений до такой степени, что эти значения могут быть надежно измерены.
- Необходимая точность измерений напряжения в типичных случаях – 3-4 значащих знака.
- Анализ переходных процессов в рассматриваемой схеме создает предпосылки для создания в перспективе экспресс-методики отбраковки по емкости и сопротивлению утечки конденсаторов одной партии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kozodaev Dmitry, Pshchelko Nickolay, Zakrzhevsky Vladimir Analysis of Electret Sub-Miniature Microphones. В сборнике: Proceedings - International Symposium on Electrets. 10th International Symposium on Electrets (ISE 10). Sponsors: IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society. Delphi, Greece, 1999. С. 797-800.
- [2] Пщелко Н.С., Козодаев Д.А. Оптимизация параметров электретных микрофонов // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 1997. № 504. С. 87.
- [3] Электретный эффект в структурах SI-SiO₂ и SI-SiO₂-Si₃N₄. Козодаев Д.А. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Санкт-Петербург, 2002.
- [4] Пщелко Н.С., Кузнецов В.И. Экспериментальное исследование абсорбированного заряда металл-оксидных конденсаторов. Физическое образование в ВУЗах. 2023. Т. 29. № 2. С. 130-144.
- [5] Пщелко Н.С. Физика. Специальные разделы: техническое использование электростатики: Учебное пособие / Сер. 76 Высшее образование. (2-е изд., испр. и доп) Москва, 2020.
- [6] Пщелко Н.С. Электрофизические методы неразрушающего контроля и формирования металлодиэлектрических структур. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Санкт-Петербургский государственный горный университет. Санкт-Петербург, 2011.
- [7] Козодаев Д.А., Налимова С.С., Мошников В.А. Методы нанодиагностики, дополняющие результаты атомно-силовой микроскопии. В книге: От нанотехнологии к наноархитектонике. Сборник научных трудов. Уфа, 2024. С. 91-167.
- [8] Козодаев Д.А., Нестеров С.И., Трусов М.А., Комарова С.О., Новиков И.А. Новые научные инструменты для наномасштабных исследований современных материалов и диагностики наноструктур. В книге: Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах. сборник тезисов докладов и сообщений на Всероссийской конференции с международным участием. Уфа, 2024. С. 80.
- [9] Акчурин Т.Р., Пщелко Н.С., Водкайло Е.Г. Программа для определения диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления высокоомных материалов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015661225, 21.10.2015. Заявка № 2015616869 от 27.07.20