

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАНАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

© 2019 г. В. А. Пахотин^{a,*}, Н. Т. Сударь^{b,**}

^a Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

^b Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: v.pakhotin@mail.ioffe.ru

**e-mail: sudar53@mail.ru

Поступила в редакцию 06.09.2018 г.

После доработки 10.10.2018 г.

Принята к публикации 01.11.2018 г.

Разработана методика, позволяющая измерить скорость изменения сопротивления канала пробоя и оценить истинную силу и длительность тока пробоя. Методика основана на зависимости амплитуды и частоты колебаний измеряемого тока от сопротивления канала. Определены сопротивление канала пробоя и ток пробоя в пленке полимерного диэлектрика.

DOI: 10.1134/S0032816219020289

ВВЕДЕНИЕ

Проблема электрической прочности диэлектриков представляет большой научный и практический интерес. Одним из важнейших в физике пробоя является вопрос о развитии канала пробоя и характеристиках тока в канале. Такие данные важны для понимания механизмов электрического разрушения диэлектриков. В настоящее время отсутствует общепринятая модель электрического разрушения полимерных диэлектриков, широко используемых в качестве изоляции. Нет даже надежных данных о величине сопротивления канала и соответственно тока пробоя, вызывающего разрушение диэлектриков.

Сопротивление канала определяется не только его геометрией, но и физическими параметрами среды: подвижностью и концентрацией носителей заряда. Поэтому совершенствование методов измерения сопротивления канала пробоя необходимо как с физической, так и практической точки зрения.

Надежные экспериментальные данные о токах пробоя, по нашему мнению, отсутствуют потому, что существующие методики регистрации тока в канале пробоя несовершенны и их использование приводит к большому разбросу экспериментальных данных. Так, при испытании полимерных пленок толщиной несколько микрон значения сопротивления канала пробоя могут отличаться примерно в 100 раз: 500 Ом [1] и 6 Ом [2].

Цель настоящей работы – установить влияние параметров измерительной схемы, используемой для регистрации пробоя, на амплитудные и частотные характеристики регистрируемых сигналов и определить параметры схемы, необходимые для получения надежных данных о свойствах канала пробоя диэлектриков. В качестве примера проведен анализ данных, полученных в опытах с полимерными пленками.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАНАЛА ПРОБОЯ

В настоящее время чаще всего для регистрации тока пробоя используется способ, основанный на измерении падения напряжения на сопротивлении, включенном последовательно с образцом [1–3]. Схема реализации данного способа измерений представлена на рис. 1а. Рассмотрим ее особенности. От высоковольтного источника напряжения через ограничительное сопротивление заряжают конденсатор C_d . При пробое конденсатор C_d разряжается через образец и измерительное сопротивление R . По падению напряжения на измерительном сопротивлении можно рассчитать протекающий в цепи ток.

Поскольку все элементы цепи включены последовательно, то измеренный ток считают током пробоя. По величине измеренного тока можно оценить сопротивление канала пробоя R_0 . Вместо конденсатора C_d некоторые авторы используют

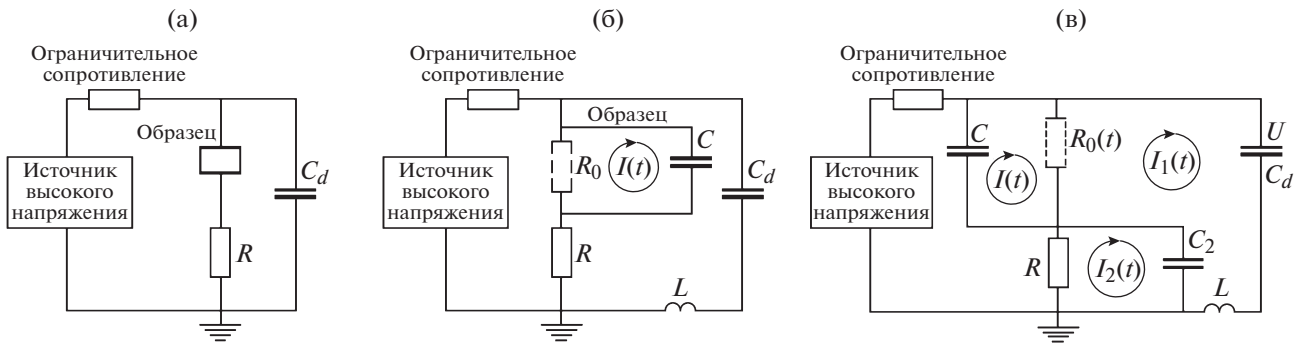


Рис. 1. Схемы измерения тока пробоя: **а** – без учета сопротивления канала пробоя и реактивных элементов; **б** – с учетом сопротивления канала пробоя и реактивных элементов; **в** – эквивалентная схема. C – емкость образца диэлектрика с электродами; C_d – дополнительный конденсатор; R – сопротивление измерительного резистора; R_0 – сопротивление канала пробоя; C_2 – емкость монтажа измерительного резистора либо специально добавленная к ней емкость; L – индуктивность проводников цепи; U – напряжение источника питания; $I(t)$ – ток пробоя (не замыкающийся на “землю”); $I_1(t)$, $I_2(t)$ – контурные токи.

накопительную длинную линию, а для гальванической развязки последовательно с сопротивлением R включают светоизлучающие диоды и с помощью фотодетектора судят о протекающем токе [4]. С этой же целью можно регистрировать радиоволны, вызванные протеканием тока в процессе пробоя [5]. Понятно, что указанные модификации способа измерений не изменяют принципа работы схемы, представленной на рис. 1а.

Описанный выше способ определения сопротивления канала пробоя справедлив только для постоянного тока. На практике измеряемый в этой схеме ток имеет форму импульса длительностью порядка 100 нс. Паразитная индуктивность L проводников (рис. 1б), которая всегда имеется в подобных схемах, приводит к осцилляциям измеряемого напряжения. Заполненные колебаниями импульсы при пробое наблюдались в работах [6, 7]. Величиной индуктивности определяются частота и амплитуда колебаний. Кроме того, на частотах выше 100 МГц индуктивное сопротивление может достигать сотен ом. Поэтому индуктивность может функционировать как гасящее сопротивление, зависящее от частоты. Чтобы снизить погрешность, вносимую реактивным сопротивлением, исследователи прибегали к методам измерений тока, позволяющим скомпенсировать индуктивность [8]. Однако средства и элементы компенсации приводят к существенному усложнению схемы измерения и понижают ее быстродействие.

К большим ошибкам измерений в схеме на рис. 1а приводит также неучет того, что ток пробоя складывается не только из тока, замыкающегося на “землю” (или общий провод), но и из тока саморазряда $I(t)$ конденсатора-образца C , который не может быть измерен непосредственно, поскольку он замыкается в объеме образца (рис. 1б). Действительно, предположим, что пробой произошел при напряжении $U = 1000$ В и сопротив-

лении $R = 1$ кОм, $R_0 = 10$ Ом. Тогда измеренный ток будет примерно равен 1 А (без учета реактивного сопротивления), а амплитуда импульса тока $I(t)$ составит 100 А, поскольку емкость C образца с электродами заряжена до такого же напряжения U , что и C_d . Очевидно, что этот ток и будет по всем параметрам наиболее близок к истинному току пробоя.

Сопротивление канала пробоя в общем не является постоянной величиной. В случае незавершенного пробоя в органических диэлектриках канал может оставаться в проводящем состоянии (вследствие обугливания) на протяжении всей длительности измеряемого импульса тока [2, 9, 10]. При завершенном пробое, характеризующемся, в частности, образованием отверстия в образце диэлектрика, сопротивление вначале очень быстро уменьшается, а затем увеличивается. Для того чтобы узнать, как изменяется сопротивление канала пробоя, нужно иметь сведения о взаимосвязи протекающих токов в измерительной схеме с параметрами ее элементов. Необходимы тщательный анализ схемы измерений и определение соотношений между параметрами элементов схемы, позволяющих получить корректные данные о характеристиках пробоя диэлектриков.

С этой целью рассмотрим наиболее общую, на наш взгляд, эквивалентную схему (э.с.) измерения (рис. 1в), в которой емкость C_2 – это либо емкость монтажа измерительного резистора, либо специально добавленная к ней емкость, а $I_1(t)$, $I_2(t)$ – контурные токи. В [11] для этой э.с. выведена формула, позволяющая определить сопротивление канала пробоя (при условии отсутствия его временной зависимости) по времени затухания колебаний. Однако из-за нестационарного характера осциллограмм нередко измерение времени затухания колебаний становится затруднитель-

ным. Поэтому в настоящей работе предлагаются альтернативные способы измерения сопротивления канала. Известные и предлагаемые способы следует рассматривать как взаимодополняющие.

В э.с. индуктивность электродов измерительного конденсатора считаем пренебрежимо малой. Будем также полагать, что сопротивление канала пробоя зависит от времени: $R_0 = R_0(t)$. Уравнения для токов при этом становятся параметрическими и могут быть решены только численно. Для численного решения задачи система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{dU_d}{dt} &= v; \\ \frac{dv}{dt} &= -\frac{U_c + U_d + U_2}{LC_d}; \\ \frac{dU_c}{dt} &= v \frac{C_d}{C} - \frac{U_c}{CR_0(t)}; \\ \frac{dU_2}{dt} &= v \frac{C_d}{C_2} - \frac{U_2}{C_2 R}, \end{aligned} \quad (1)$$

где индексы у напряжений U соответствуют индексам у конденсаторов в схеме на рис. 1в. Примем начальные условия: $v(0) = 0$, $U_c(0) = U$, $U_2(0) = 0$, $U_d(0) = -U$. Для решения системы (1) выражение для $R_0(t)$ записывается в явном виде. Численное решение системы (1) выполнялось модифицированным методом Эйлера [12].

Вначале исследуем случай фиксированного сопротивления канала пробоя R_0 . Примем, что в момент времени $t = 0$ сопротивление образца мгновенно изменяется от R_i до R_0 , причем $R_i \gg R_0$. При этом конденсаторы C и C_d , заряженные до напряжения U , разряжаются. На рис. 2 представлены графики напряжения $U_2(t)$ на измерительном сопротивлении и тока $I(t)$ в случае, когда сопротивление канала пробоя $R_0 = 10$ Ом и $C = 5$ пФ, $C_2 = 20$ пФ, $C_d = 56$ пФ, $R = 1300$ Ом, $L = 0.2$ мкГн, $U = 1000$ В. Там же показан график $U_2(t)$ при $L = 0$ (кривая 2). Истинный ток пробоя I (кривая 3) значительно превышает измеряемый ток I_1 , амплитуда которого приблизительно равна $U_2/R \approx 1$ А. Длительность импульса тока I составляет $R_0 C \approx 0.05$ нс. В момент пробоя образец шунтирует остальную часть цепи. Следует подчеркнуть, что ток $I(t)$ может быть определен только расчетным путем.

По общему напряжению $U_2(t)$ (см. рис. 2) судить о сопротивлении канала можно только качественно. Наличие постоянной составляющей в импульсе пробоя, сопоставимой по уровню с напряжением пробоя, указывает на то, что сопротивление канала пробоя много меньше измерительного сопротивления. Чтобы получить более определенные данные о величине R_0 , заметим,

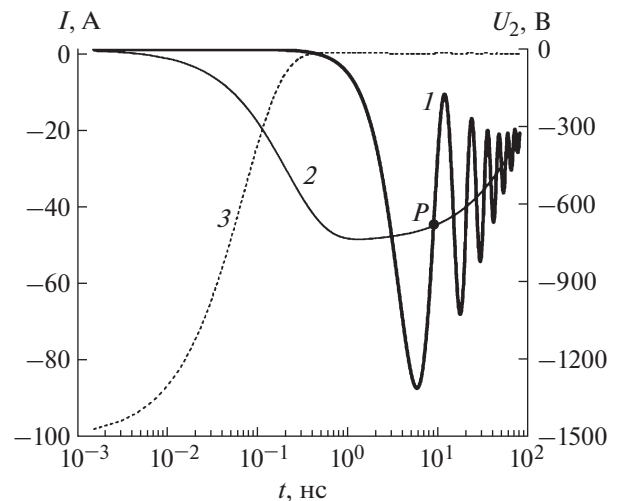


Рис. 2. Изменение со временем напряжения $U_2(t)$ на измерительном сопротивлении при $L \neq 0$ (1) и $L = 0$ (2), а также тока $I(t)$ (3). Графики построены для $C = 5$ пФ, $C_2 = 20$ пФ, $C_d = 56$ пФ, $R = 1300$ Ом, $L = 0.2$ мкГн.

что осциллирующую кривую напряжения $U_2(t)$ (или тока $I_1(t)$) можно рассматривать как результат суперпозиции тока с затухающими колебаниями (из-за наличия индуктивности) и тока в отсутствие индуктивности в цепи. Соответствующее напряжение $U_0(t)$ на рис. 2 показано кривой 2. Обычно эту кривую называют средней волновой линией (далее средней линией). Амплитуду и затухание колебаний удобно отсчитывать от средней линии. Поскольку параметры средней линии от индуктивности не зависят, то можно использовать ее для определения сопротивления канала.

На рис. 3а приведены графики средних линий для различных сопротивлений канала, анализ которых показывает смещение начальной части кривой $U_0(t)$ при изменении сопротивления канала. Воспользуемся тем, что напряжение в точке пересечения средней линии с осциллограммой, соответствующей началу колебаний (точка P на рис. 2), будет также зависеть от R_0 . Обозначим U_m напряжение средней линии в точке P . Соответствующий расчетный график для $U_m(R_0)/U$ представлен на рис. 3б.

На практике следует построить среднюю линию приближенно, по средним точкам осциллограммы. Для этого можно также воспользоваться специальными программами для обработки данных. Начальная точка средней линии должна совпадать по времени с началом существенных колебаний напряжения $U_2(t)$. Измерив U_m , можно будет определить R_0 , соответствующее моменту пробоя. Точность этого метода зависит, в первую очередь, от точности измерения осциллограммы, а также от корректности построения средней линии. Для

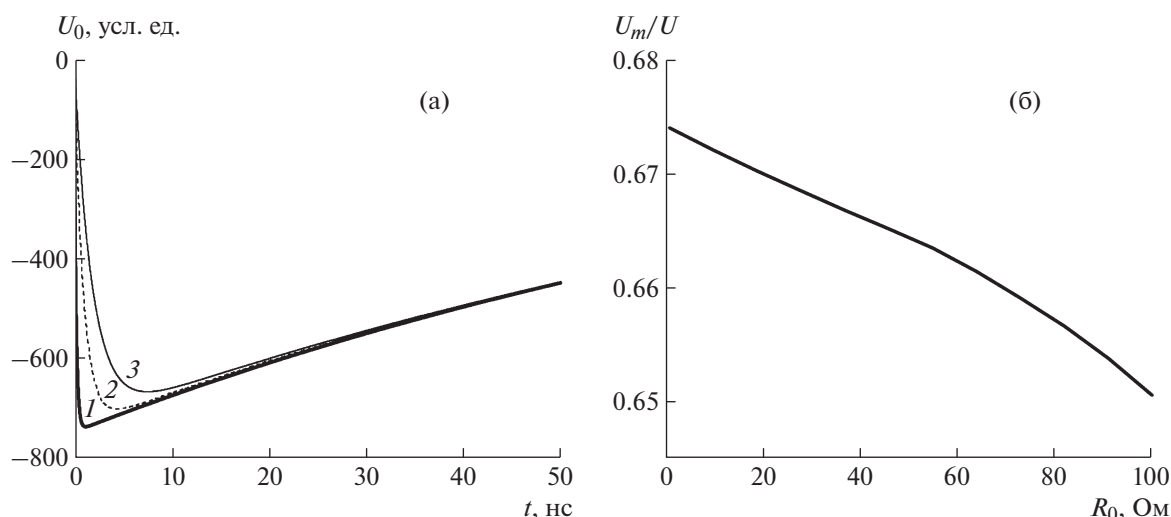


Рис. 3. Зависимости: а – напряжения средней линии U_0 на измерительном сопротивлении от времени при $R_0 = 1 \text{ Ом}$ (1), 10 Ом (2), 100 Ом (3); б – относительной величины U_m/U от сопротивления канала R_0 .

интервала дискретизации осциллографа $\Delta t = 1 \text{ нс}$ и частоты сигнала $f = 100 \text{ МГц}$ относительная ошибка по амплитуде будет составлять порядка $(\Delta f)^2 = 1\%$ [13]. При уменьшении измерительного сопротивления средняя линия будет смещаться к нулевой линии и точность этого способа упадет.

Далее рассмотрим частотные характеристики э.с. Обозначим $Z(f)$ импеданс э.с., где f – частота. Приравнявая к нулю мнимую часть импеданса, можно получить выражение для собственной частоты колебаний э.с. В общем случае частота соб-

ственных колебаний э.с. является функцией сопротивления канала пробоя R_0 (рис. 4, кривая 1). Видно, что уже при $R_0 \sim 500\text{--}1000 \text{ Ом}$ частота колебаний возрастает в 1.5–2 раза. Судя по э.с. на рис. 1в, при сопротивлении канала $\sim 10 \text{ Ом}$ ток через емкость образца пренебрежимо мал, поскольку ее сопротивление на частоте 100 МГц составляет $\approx 300 \text{ Ом}$. При этом низшая частота f_1 будет определяться емкостями C_2 и C_d .

Когда же сопротивление канала пробоя велико, ток проходит в обход этого сопротивления. В этом случае высшая частота f_2 будет определяться наименьшей из емкостей. Таким образом, отличие частот f_1 и f_2 при относительно большой емкости C_d будет зависеть от соотношения емкостей C_2 и C . С целью получения заметной разницы в частотах при проведении измерений целесообразно увеличить C_2 так, чтобы $C_2 > C$. Используя найденную зависимость собственной частоты колебаний, можно оценить сопротивление канала по экспериментально измеренной частоте колебаний тока, протекающего по сопротивлению R . Частоту основного спектрального пика можно измерить с помощью преобразования Фурье напряжения $U_2(t)$.

Согласно рис. 4, при относительно больших сопротивлениях канала частота колебаний практически перестает зависеть от R_0 и точность измерения R_0 по частоте заметно снижается. В этом случае для определения величины R_0 можно попытаться измерить время затухания колебаний и воспользоваться формулой, предложенной в [11].

Заметим, что при достаточно большой емкости измерительной ячейки и $C_d > C_2$ может ока-

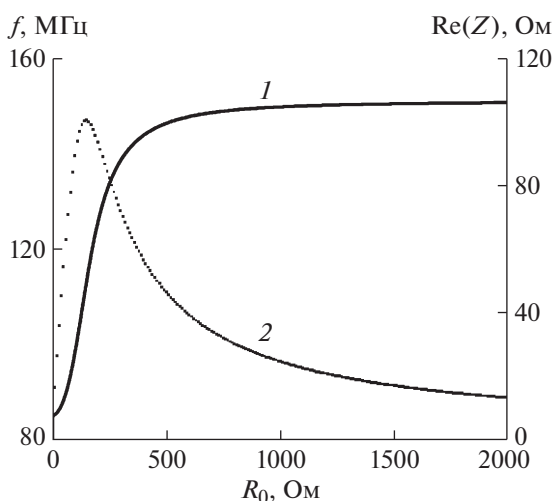


Рис. 4. Зависимости частоты собственных колебаний э.с. (1) и активного сопротивления э.с. (2) от сопротивления R_0 канала пробоя. Графики построены для $C = 5 \text{ пФ}$, $C_2 = 20 \text{ пФ}$, $C_d = 56 \text{ пФ}$, $R = 1300 \text{ Ом}$, $L = 0.2 \text{ мкГн}$, $f_1 \approx 87 \text{ МГц}$, $f_2 \approx 150 \text{ МГц}$.

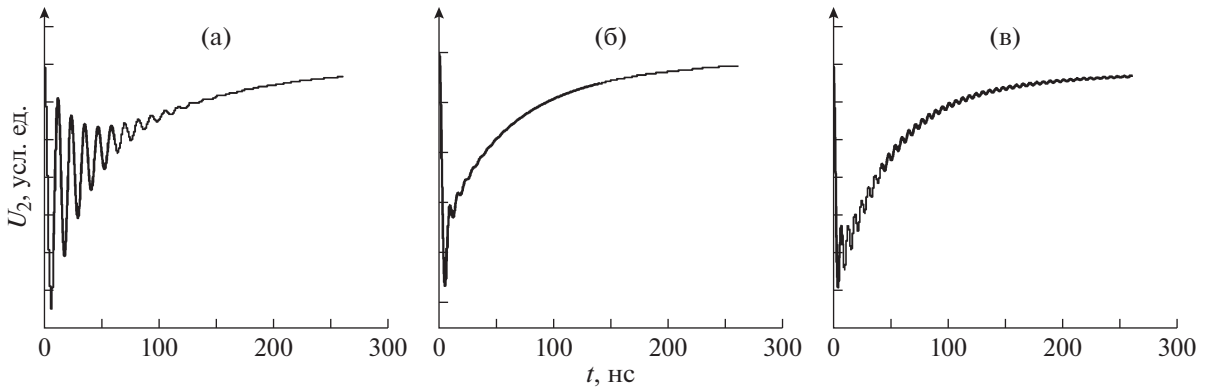


Рис. 5. Расчетные зависимости напряжения (тока) на измерительном сопротивлении R в схеме, показанной на рис. 1в, при изменении сопротивления канала пробоя в соответствии с выражением (2) при K , Ом/нс: 0.002 (а), 25 (б) и 100 (в); $t_0 = 1$ нс, $R_{01} = 10$ Ом.

заться, что $C \sim C_d$ и частоты колебаний будут близки независимы от величины сопротивления канала R_0 , т.е. $f_1 \approx f_2$. При этом возможность определения изменения сопротивления канала по изменению частоты утрачивается.

Перейдем теперь к рассмотрению случая изменяющегося сопротивления канала пробоя. Предположим, что в момент пробоя за короткое время, равное t_0 , сопротивление канала уменьшается до величины R_{01} , после чего увеличивается по линейному закону:

$$R_0(t) = K(t - t_0) + R_{01}, \quad (2)$$

здесь K – скорость изменения сопротивления.

Можно выбрать произвольную функцию $R_0(t)$. Линейная зависимость, как будет показано далее, соответствует характеристикам тока, полученным экспериментально. На рис. 5 представлена расчетная зависимость напряжения (тока) на измерительном сопротивлении R (см. схему на рис. 1в) при изменении сопротивления канала пробоя в соответствии с выражением (2) для различных K . Соответствующие спектры Фурье представлены на рис. 6.

Графики построены для тех же значений параметров э.с., что и на рис. 4. Из представленных данных видно, что форма и спектр тока зависят от скорости K изменения сопротивления канала, хотя в момент начала изменения сопротивление одинаково для приведенных на рис. 5 графиков ($R_{01} = 10$ Ом). При увеличении K форма импульса тока изменяется: сначала ярко выраженный колебательный характер на сравнительно низкой частоте при $K = 0.002$ Ом/нс (рис. 5а и кривая 1 на рис. 6), затем область демпфирования колебаний при $K = 25$ Ом/нс (рис. 5б и кривая 2 на рис. 6) и, наконец, зона высокочастотных колебаний с небольшой амплитудой при $K = 100$ Ом/нс (рис. 5в и кривая 3 на рис. 6). Такие зависимости полно-

стью соответствуют характеру изменения частоты колебаний и действительной части импеданса (кривая 2 на рис. 4). Кривая действительной части импеданса в зависимости от R_0 строилась при частотах собственных колебаний, соответствующих текущему R_0 . Время затухания колебаний τ_d определяется активным сопротивлением э.с.:

$$\tau_d = \frac{2L}{\text{Re}(Z)}. \quad (3)$$

Когда сопротивление канала изменяется медленно и остается небольшим, частота колебаний также близка к нижней частоте f_1 (рис. 6, кривая 1) и затухание в цепи невелико. При большой скорости изменения сопротивления канала ($K = 100$ Ом/нс) происходит быстрый переход $\text{Re}(Z)$ на правую часть кривой 2 на рис. 4, где затухание невелико. При частоте 100 МГц период колебаний составляет 10 нс. За период сопротивление возрастает до

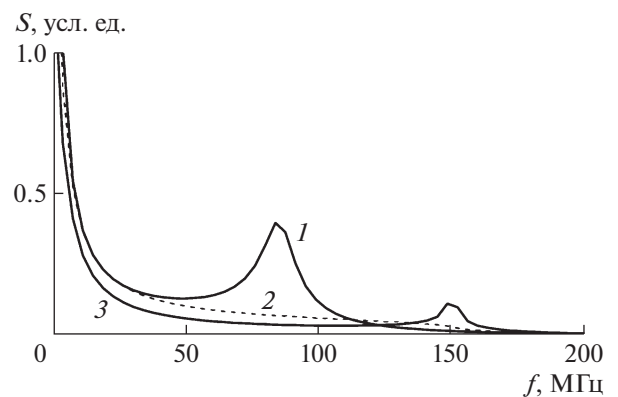


Рис. 6. Расчетные спектры Фурье напряжения (тока) на измерительном сопротивлении R в схеме на рис. 1в при изменении сопротивления канала пробоя в соответствии с выражением (2) при K , Ом/нс: 0.002 (1), 25 (2) и 100 (3).

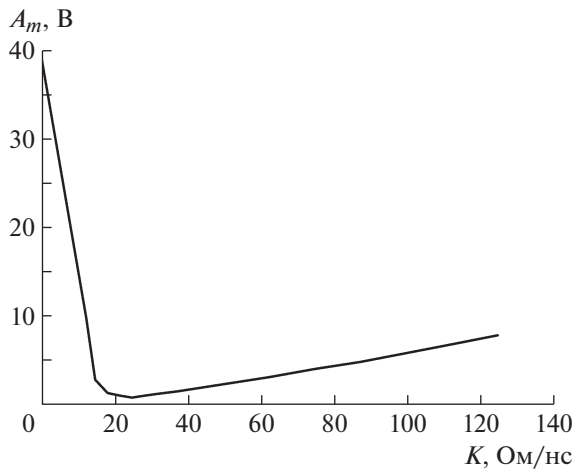


Рис. 7. Зависимость максимальной амплитуды колебаний A_m от скорости K изменения сопротивления канала пробы.

1 кОм, и колебания просто не успевают затухнуть, а частота колебаний приближается к частоте f_2 (рис. 6, кривая 3).

При больших сопротивлениях канала (рис. 4, кривая 2) $\text{Re}(Z)$ мало и τ_d велико. Амплитуда колебаний при $K = 100$ Ом/нс будет значительно меньше, чем при $K = 0.002$ Ом/нс, поскольку большая часть от общего напряжения U падает на сопротивлении канала. Если же $K = 25$ Ом/нс, то сопротивление канала увеличивается на порядок за 40 нс, а $\tau_d \approx 4$ нс, и колебания успевают заметно затухнуть (рис. 5б). Среднюю линию при изменяющемся во времени сопротивлении канала необходимо рассчитывать численно по выражению (1) при $L \rightarrow 0$.

На рис. 7 представлена зависимость максимальной амплитуды колебаний A_m от скорости K изменения сопротивления канала пробы. В качестве A_m принята амплитуда первой положительной полуволны колебаний, начинающейся в точке P на рис. 2. Расчет был сделан для напряжения пробы $U = 84$ В. Чтобы воспользоваться этим графиком для произвольного U , новое значение максимальной амплитуды колебаний A'_m следует рассчитывать по следующей формуле:

$$A'_m = \frac{UA_m}{84}. \quad (4)$$

Используя этот график и измеренную экспериментально A'_m , можно будет определить скорость изменения сопротивления канала пробы. Необходимо отметить, что A'_m практически не зависит от начального сопротивления канала.

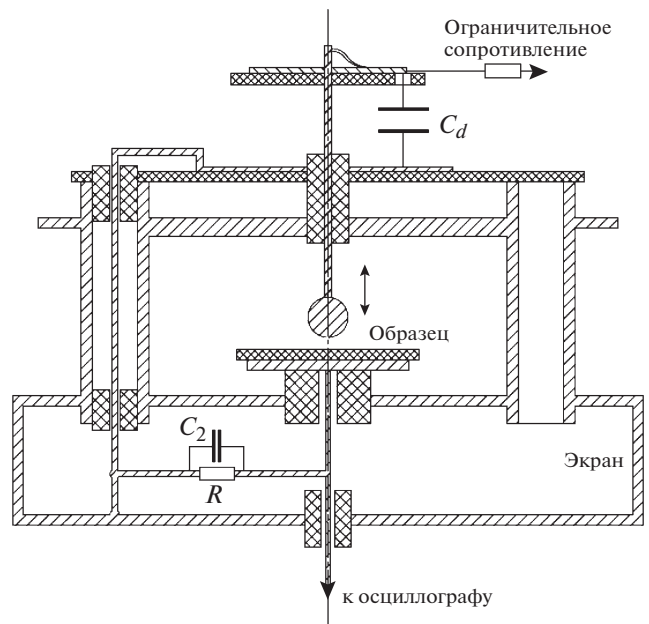


Рис. 8. Схема экспериментальной установки.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАНАЛА ПРОБОЯ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ

Предложенная методика была использована для обработки экспериментальных данных, полученных на установке для электрического пробоя полимерных пленок с электродами шар–плоскость, погруженными в трансформаторное масло. Полимерные пленки наносились на подложку из алюминиевой фольги методом центрифугирования из раствора полимеров в дихлорэтане. Схема установки представлена на рис. 8. Верхний шаровой электрод был изготовлен из вольфрама, диаметр шара 5 мм.

Численные значения элементов схемы были использованы при расчетах напряжения и тока, графики которых представлены на рис. 2. В качестве измерительного сопротивления использовался безындуктивный резистор типа С2-10-1. Измерительное сопротивление составляло $R = 1.3$ кОм. Если это сопротивление сделать малым ($R \ll 1$ кОм), то качественно все закономерности, описанные выше, сохраняются, однако характерные времена заметно уменьшаются. Например, экстремум напряжения регистрируемого импульса будет лежать в субнаносекундной области. Кроме того, амплитуда импульса напряжения на измерительном сопротивлении существенно уменьшится. Таким образом, снижение измерительного сопротивления потребует применения более широкополосной регистрирующей аппаратуры и приведет к снижению помехоустойчивости измерений.

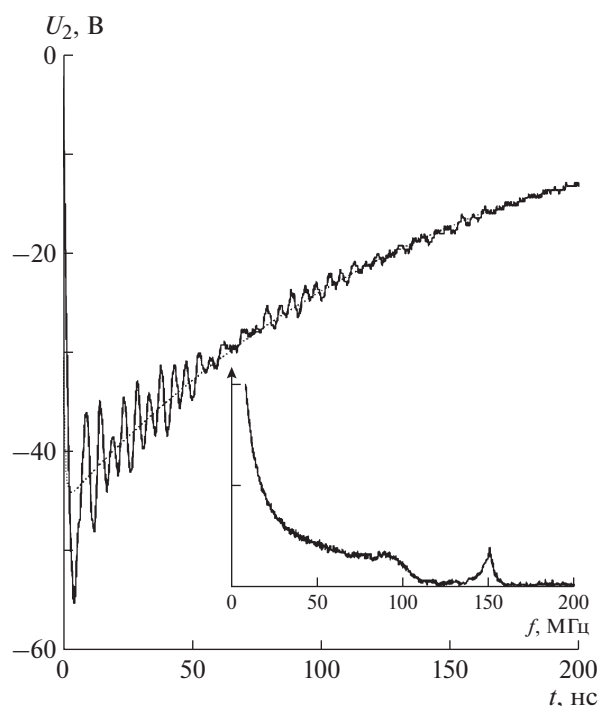


Рис. 9. Осциллограмма напряжения на измерительном сопротивлении, полученная при пробое пленки ПС толщиной 0.3 мкм. Пунктиром показана средняя линия. На вставке представлен соответствующий спектр Фурье.

Конденсаторы C_d и C_2 выбраны типа К15У-1 с рабочим напряжением 3.5 кВ. В экспериментах использовался широкополосный запоминающий осциллограф ADS-2332 (интервал дискретизации 1 нс) с высоковольтным делителем ТТНУ250 с граничной частотой 300 МГц. Пробой пленок осуществлялся в режиме подъема напряжения с постоянной скоростью.

На рис. 9 представлена зарегистрированная в опыте осциллограмма сигнала, полученного при пробое пленочного образца полистирола (ПС) толщиной 0.3 мкм. Приведенная осциллограмма схожа с расчетной зависимостью напряжения на измерительном сопротивлении при изменении сопротивления канала пробоя с относительно высокой скоростью (рис. 5в). Напряжение пробоя равно 84 В. Из осциллограммы определяем наибольшую амплитуду колебаний — $A_m \approx 5$ В. Здесь следует обратить внимание на то, что функция на рис. 7 является двузначной и что надо выбирать большее значение K . Это следует из того, что колебания на рис. 9 затухают слабо. Действительно, при $K \approx 15$ Ом/нс для достижения области небольшого затухания на рис. 4 (кривая 2) (500 Ом) требуется время 30–40 нс, за которое колебания успеют затухнуть, в этом случае осциллограмма подобна изображенной на рис. 5б. Поэтому из графика на рис. 7 находим, что $K \approx 87.5$ Ом/нс.

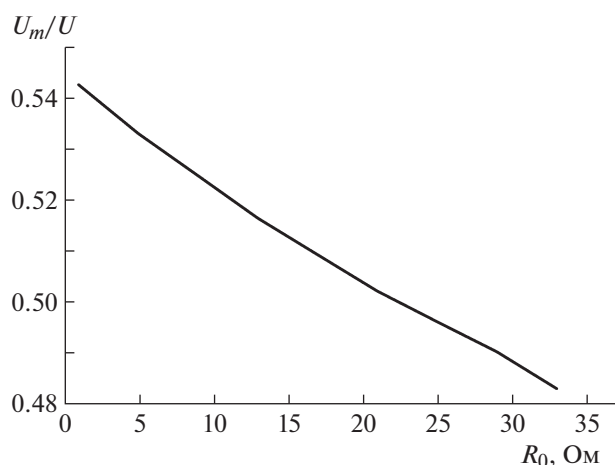


Рис. 10. Зависимость относительной величины U_m/U от сопротивления канала R_0 .

Для этой скорости изменения сопротивления канала пробоя на рис. 10 приведена зависимость относительной величины U_m/U от сопротивления канала R_0 . Эта зависимость была получена путем решения системы уравнений (1) при $K \approx 87.5$ Ом/нс и $L \rightarrow 0$. Из рис. 9 определяем, что $U_m \approx 43.3$ В и $U_m/U \approx 0.52$. Пользуясь графиком на рис. 10, найдем, что в выражении (2) $R_{01} \approx 12$ Ом. Путем использования быстрого преобразования Фурье получим, что спектральный пик соответствует частоте 151 МГц (см. рис. 9). Согласно графику 1 на рис. 4, этой частоте соответствует сопротивление канала, равное приблизительно 700 Ом. Поэтому оно было достигнуто за время, равное примерно $700/K \approx 8$ нс.

С течением времени изменение сопротивления будет определяться линейным приближением (2). Точность измерения сопротивления канала в произвольный момент времени определяется точностью измерения частоты колебаний, поскольку в области относительно больших сопротивлений частота колебаний изменяется незначительно (см. рис. 4, кривая 1). Также в этой области действительная часть импеданса э.с. резко уменьшается, что способствует относительно длительным колебаниям с небольшой амплитудой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен детальный анализ обобщенной электрической схемы для измерения характеристик электрического пробоя диэлектриков. Найдена зависимость собственной частоты колебаний и их затухания от сопротивления канала пробоя. Путем решения системы уравнений с переменным во времени сопротивлением канала пробоя определены ток и напряжение на измери-

тельном сопротивлении, а также истинный ток пробоя (ток, замыкающийся внутри образца). Показано, что истинный ток пробоя может существенно превышать измеряемый ток, а его длительность, определяемая величиной RC , может составлять доли наносекунд. Практически истинный ток пробоя может быть определен только расчетным путем, поскольку он замыкается внутри образца диэлектрика. Теоретически возможно дополнительно измерить падение напряжения на образце, но при этом емкость и индуктивность делителя напряжения будут искажать результаты измерений. Кроме того, делитель напряжения должен иметь практически недостижимые параметры – высокий динамический диапазон (60–100 дБ) и полосу частот выше 1 ГГц.

Акцентируется внимание на целесообразность использования режима колебаний измерительной схемы для получения более полной информации о сопротивлении канала пробоя и даны некоторые рекомендации по соотношениям параметров элементов схемы. Установлено, что амплитуда и частота колебаний измеряемого тока зависят от скорости изменения сопротивления канала пробоя. При низких скоростях ($K < 10$ Ом/нс) осциллограммы имеют ярко выраженный колебательный характер с амплитудами порядка величины пробивного напряжения и слабое затухание. В области высоких скоростей ($K > 40$ Ом/нс) колебания характеризуются амплитудами, много меньшими пробивного напряжения, и также слабым затуханием. В промежуточной области скоростей имеет место демпфирование колебаний.

На основе найденных закономерностей разработана методика определения сопротивления канала пробоя по осциллограмме напряжения (тока) на измерительном сопротивлении. Сущность методики состоит в построении расчетных зависимостей уровня средней линии осциллограммы и амплитуды колебаний напряжения от сопротивления канала пробоя и от скорости изменения сопротивления канала пробоя. Сопротивление канала определяется путем сопоставления расчетных и измеренных параметров импульса пробоя.

Методика была использована для определения сопротивления канала пробоя тонкопленочных полимерных диэлектриков. При пробое тонких пленок ПС (0.3 мкм) наблюдаются слабозатухающие колебания на относительно высокой частоте (151 МГц) с небольшими амплитудами ($\ll U$) и с заметным смещением средней линии ($\sim U$) относительно нуля. Начальное сопротивление канала составляет 12 Ом, амплитуда импульса истинного

тока пробоя равна приблизительно 7 А, а длительность – 0.06 нс. При этом амплитуда импульса тока на измерительном сопротивлении равна $55/1300 \approx 0.042$ А, т.е. $\ll 7$ А.

Сопротивление канала за время порядка 10 нс увеличивается приблизительно до 1 кОм. Начиная с такого сопротивления канала, частота колебаний и их затухание практически перестают изменяться, поэтому делать количественные выводы о величине сопротивления канала становится трудно. В дальнейшем необходимо попытаться найти такие соотношения между параметрами измерительной схемы, при которых насыщение зависимости $f(R_0)$ (см. рис. 4, кривая 1) будет достигаться при более высоких сопротивлениях канала. Изучение эволюции сопротивления канала пробоя позволит детализировать явление пробоя и будет способствовать выяснению характера проводимости канала в различных диэлектриках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Riehl N., Baessler H., Spannring W. // Z. angew. Phys. 1969. V. 27. P. 261.
2. Segui Y., Bai Ai, Carchano H. // J. Appl. Phys. 1976. V. 47 (1). P. 140. <https://doi.org/10.1063/1.322361>
3. Liu D., Kao K.C. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69 (4). P. 2489. <https://doi.org/10.1063/1.348966>
4. Yamada H., Fujiwara T., Suzuoki Y. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1993. V. 26. P. 1328. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/26/8/029>
5. Shibuya Y., Matsumoto S., Tanaka M., Muto H., Kaneda Y. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2010. V. 17 (3). P. 862. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5492260>
6. Zhao L., Liu G.Z., Su J.C., Pan Y.F., Zhang X.B. // IEEE Transactions on plasma science. 2011. V. 39 (7). P. 1613. <https://doi.org/10.1109/TPS.2011.2143435>
7. Zhao L., Pan Y.F., Su J.C., Zhang X.B., Wang L.M., Fang J.P., Sun X., Lui R. // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 105114. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4826295>
8. Проскурин Б.Б., Кривовяз В.И., Егоров А.Г. // ПТЭ. 1992. № 2. С. 143.
9. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высшая школа, 1966.
10. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики (основные свойства и применения в электронике). М.: Радио и связь, 1989.
11. Пахотин В.А., Закревский В.А., Сударь Н.Т. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 8. С. 40. <https://doi.org/10.1134/S1063784215080186>
12. Дьяконов В.П. Система MathCAD. М.: Радио и связь, 1993.
13. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т. 1. М.: Мир, 1983.