К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ЭНЕРГИИ ПРОБОЯ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

А. А. ВОРОБЬЕВ и А.Ф. КАЛГАНОВ

Введение

Пробой диэлектрика наступает тогда, когда в нем выделится необходимая для этого энергия. Эта энергия отбирается от электрического поля, создаваемого приложенным к диэлектрику напряжением. Согласно современным представлениям, потеря энергии при пробое связана с процессом ускорения электронов в диэлектрике. Энергия расходуется на ионизацию частиц структуры диэлектрика, на возбуждение их колебаний и на излучение.

Так, в процессе пробоя воздуха на один акт ионизации при нормальных условиях затрачивается энергия $W = \frac{E}{\alpha} = 2630 \ \mathfrak{ss}$, где $E = 30 \ \kappa \mathfrak{s}/cm$

пробивная напряженность поля для воздуха, а $\alpha = 11,4$ —число ионизаций в воздухе на 1 см пути при такой напряженности поля [1]. Большая часть энергии идет на нагревание газа и излучение, так как непосредственно на ионизацию затрачивается всего около 15 эв [2].

Как обнаружил Б. М. Гохберг, пробой газов происходит вследствие достижения определенной величины коэффициента объемной ионизации а, примерно одинаковой для различных газов [3, 4]. Из соотношения $E = \mathbf{W} \cdot \mathbf{a}$ видно, что при постоянной величине а пробивная напряженность поля определяется величиной энергии, затрачиваемой на один акт ионизации. Когда потери энергии электронов в газе велики, коэффициент а достигает своего значения при большей напряженности поля и, наоборот, при малых потерях энергии—при меньшей напряженности поля.

Для твердых диэлектриков в зависимости от того, в какой вид энергии превращается энергия электрического поля, имеет место та или иная форма пробоя (тепловая, электрохимическая, электрическая). Это, в свою очередь, определяет пробивное напряжение, соответствующее той или иной форме пробоя.

Механическому разрушению диэлектрика при пробое предшествует потеря им электрической прочности. После пробоя диэлектрика по образовавшемуся каналу протекает сквозной ток. Поэтому общую энергию, затрачиваемую при пробое, следует разделить на три составляющих:

$$W_{nom} = W_{\phi} + W_{pasp} + W_{mok}, \qquad (1)$$

где W_{ϕ} — энергия, выделение которой в диэлектрике вызывает потерю им электрической прочности; она может быть названа энергией формирования разряда. W_{pa3p} — энергия, выделение которой приводит к разрушению диэлектрика и образованию сквозного канала; она может быть названа энергией разрушения. $W_{mo\kappa}$ — энергия, поглощаемая в диэлектрике за счет протекания сквозного тока, зависит от проводимости образовавшегося при пробое канала и длительности протекания послепробойного тока. Сумма энергий формирования W_{ϕ} и разрушения W_{pa3p} определяет энергию, выделение которой приводит к пробою и которая может быть названа энергией пробоя: $W_{np} = W_{\phi} + W_{pa3p}$.

Энергия, поглощаемая в диэлектрике при пробое, выделяется, во-первых, за счет токов, протекающих через диэлектрик, во-вторых, за счет освобождения потенциальной (электростатической) энергии поля:

$$W_{nom} = \int_{0}^{t} iudt + \int_{V} \frac{\varepsilon E^{2}}{2} dV, \qquad (2)$$

где i — активный ток в цепи разряда, u — напряжение на диэлектрике, E — напряженность поля в диэлектрике, ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, V—объем диэлектрика между электродами и t—время приложения напряжения.

Если пробой кристаллического диэлектрика сопровождается разрушением структуры на отдельные ионы, то энергия пробоя не может быть меньше энергии решетки, отнесенной к разрушенному объему. Пои толщине образцов, используемых для исследования на электрическую прочность, в несколько сот микрон, разрушенный объем составляет порядка 10^{-7} см³. Энергия решетки такого объема для NaCl составляет 2,77 · 10^{-3} дж. Потенциальная энергия для этого же объема в условиях предпробивного состояния равняется 5,58 · 10^{-8} дж. Как видно, разрыв решетки только за счет потенциальной энергии поля, запасаемой в объеме будущего канала пробоя, невозможен, если ориентироваться на измеренные значения электрической прочности. Однако при пробое освобождается потенциальная энергия, запасаемая во всем объеме диэлектрика между электродами. Ве-

личина этой энергии легко определяется по уравнению $W = \frac{CU^2}{2}$, где $C = \frac{1}{2}$

емкость образца. При этом

$$\frac{CU^2}{2} = \int_{V} \frac{\varepsilon E^2}{2} \, dV. \tag{3}$$

Емкость исследуемых на электрическую прочность образцов в равномерном поле составляет порядка $5 - 10 \ n\kappa\phi$. При $C = 5 \ n\kappa\phi$ и $U = 15 \ \kappa s$ $\frac{CU^2}{2} = 0,563 \cdot 10^{-3} \ \partial \infty$. Этой величины энергии достаточно, чтобы разрушить объем в $0,2 \cdot 10^{-7} \ cm^3$ NaCl. Величина этого объема сравнима с величиной объема разрушения при пробое. Повидимому, как только диэлектрик потеряет электрическую прочность и образуется проводящий канал, освобождаемая энергия поляризации в сумме с энергией тока, протекающего через диэлектрик, вызывают видимое разрушение диэлектрика.

Из уравнений (2) и (3) видно, что для определения энергии, поглощаемой при пробое твердого диэлектрика, необходимо знать величины тока и напряжения на диэлектрике (что может быть получено осциллографированием процесса пробоя), а также емкость образца. И если по осциллограммам тока и напряжения определить моменты начала и конца отдельных стадий пробоя, можно подсчитать величины энергий, затраченных на развитие этих стадий. Для выяснения механизма пробоя твердых диэлектриков интересно определить как величину энергии, приводящую к потере электрической прочности, так и величину энергии, вызывающую механическое разрушение диэлектрика под действием поля высокой напряженности. Мы провели измерение калориметрическим методом общей энергии, поглощаемой при пробое твердых диэлектриков на импульсах. На рис. 1 приведена электрическая схема генерирования импульсов напряжения. Конденсатор C заряжается через сопротивления R_1 и R_2 до известного напряжения (10 – 20 кв). Напряжение зарядки определяется по астатическому вольтметру V_1 с низкой стороны высоковольтного трансформатора. Замыкание ключа S, что достигается соприкосновением шаров, вызывает разряд конденсатора C на сопротивления R_2 =10 мгом и R_3 =154 ом. Последовательно с сопротивлением R_3 путем размыкания ключа K мог выключаться диэлектрик (обр.). В отсутствие диэлектрика вся энергия, запасаемая в конденсаторе C, выделяется в сопротивлении R_3 . Доля энергии, выделяемая в сопротивлении R_2 , в первом приближении равна отношению



Рис. 1. Схема импульсного генератора для измерения потерь энергии при пробое твердых диэлектриков.

сопротивлений R_3/R_2 и, следовательно, весьма мала. При пробое образца часть запасенной в конденсаторе энергии поглощается в образце. Остальная часть энергии попрежнему выделяется в сопротивлении R_3 . Разность между энергией W_1 , выделенной в сопротивлении R_3 в отсутствие образца, и энергией W_2 , выделенной там же при пробое образца, характеризует собой величину поглощаемой в образце энергии

$$W_{nom} = W_1 - W_2 = \Delta W. \tag{4}$$

Помимо потерь в диэлектрике имеют место потери в подводящих проводах и в конденсаторе *C*. Однако эти потери для данного напряжения одинаковы в обоих случаях и при разностном методе определения потерь в диэлектрике исключаются.

Для фиксирования энергии, выделяемой в сопротивлении в форме тепла, в качестве термочувствительного элемента применено полупроводниковое термосопротивление MMT—1 в 24 ком.

Изменения в температуре термочувствительного элемента градуировались в зависимости от количества подведенного тепла. Термочувствительный элемент включался в мостовую схему (рис. 2). Для улучшения симметрии моста и повышения его чувствительности в два его плеча включались два одинаковых термосопротивления (T_1 и T_2), а в два других плеча—одинаковые магазины сопротивлений КМС—6. Настройка моста производилась с помощью одного из магазинов сопротивлений (R_{pe2}). К одной из диагоналей подключалось переменное напряжение с частотой 50 ги через симметрирующий трансформатор (С. Тр.) с коэффициентом трансформации 1/1. В другую диагональ моста включался ламповый усилитель G.

Передача тепла от сопротивления R_3 к термочувствительному элементу осуществлялась следующим образом. Сопротивление R_3 было выполнено в виде катушки диаметром 0,5 см из манганиновой проволоки диаметром

1 MINDER

0,008 см. Внутри этой катушки, как показано на рис. 2, располагалось одно из термосопротивлений (T_2), и вся система заливалась парафином, который служил как в качестве электроизолирующей среды, так и в качестве теплопроводящей среды между катушкой и термосопротивлением. Внешний слой парафина вместе со стенками плексигласовой коробочки, в которую заливается парафин, устранял влияние внешней среды (колебаний во внешней температуре и др.). Чтобы устранить влияние внешней среды на другое термосопротивление (T_1), последнее также заливалось парафином. Вся измерительная схема и калориметр тщательно экранировались. При напряженни моста 5 в цена деления выходного прибора измерительной схемы равнялась 4,1·10⁻⁴ дж или 0,00035°C.



Рис. 2. Измерительная схема для определения потерь энергии при пробое.

Так как подлежащие измерению количества энергии очень малы, необходимо было иметь и малый запас энергии в конденсаторе. Для этого надо было иметь конденсатор с очень малой емкостью и достаточно высоким рабочим напряжением. Нами был изготовлен конденсатор из органического стекла емкостью $C = 32 \ n\kappa\phi$ на рабочее напряжение более 20 кв. Запасаемая в нем энергия для случая $U = 24 \ \kappa s$ равнялась 9, $22 \cdot 10^{-3} \ dm$.

Результаты измерений

На рис. З приведена градуировочная кривая калориметра—показания измерительного прибора в зависимости от количества энергии, выделившегося в сопротивлении R_3 . Градуировка производилась на переменном напряжении. На этом же рисунке приведены значения показаний измерительного прибора, вызываемые разрядом конденсаторов с различной энергией. Как видно из графика, средние значения показаний измерительного прибора для данного значения посылаемой в калориметр энергии достаточно хорошо укладываются на прямую. То, что на этой прямой укладываются как точки, полученные на переменном токе, так и точки, полученные при разряде конденсаторов, свидетельствует о том, что вся энергия, запасаемая в конденсаторах, выделяется в приемнике, а потери энергии в контуре разряда невелики и находятся в пределах точности измерения. Разброс значений показаний прибора для одной и той же энергии связан с влиянием полей высокого напряжения на измерительную схему.

Мы провели измерение энергии, поглощаемой при пробое монокристаллов NaCl и KJ. Толщина пробиваемых образцов составляла 100 - 300 мкн Пробой производился как в равномерном, так и в неравномерном полях.

На рис. 4 приведены измеренные значения потерь ΔW в зависимости от величины разрушенного объема V образцов из NaCl. Разрушенный

100

объем V определялся путем измерения под микроскопом длины и среднего диаметра канала пробоя. Как видно из графика (рис. 4), разрушаемый объем образца в среднем больше при меньшей величине затраченной энер-



Рис. 3. Градуировочная кривая калориметра.

гии и меньше—при большей затрате энергии. Прямая, выходящая из начала координат, разделяет точки на две области. В верхней области располагаются точки, для которых отношение энергии, поглощаемой при про-



Рис. 4. Потери энергии при пробое $\Delta W \partial \mathcal{H}$ в зависимости от разрушенного объема $V c_M^3$.

○---в равномерном поле,
●--в неравномерном поле.

бое, к энергии разрушенного объема меньше единицы: $\frac{\Delta W}{W_{peu}} < 1$; в нижней области это отношение больше единицы: $\frac{\Delta W}{W_{peu}} > 1$. Прямая линия яввляется геометрическим местом точек, для которых $\Delta W = W_{peu}$. Для каменной соли величина отношения $\frac{\Delta W}{W_{peu}}$ получена от 0,1 до 2,5. Для

 $\frac{\Delta W}{W_{pew.}}$ < 1. Повидимому, в этом случае струкбольшего числа случаев тура решетки не разрушается до отдельных элементов; происходит лишь дробление вещества. При $\frac{\Delta W}{W_{peus}} > 1$ имеют место, видимо, дополнительные потери энергии за счет протекания послепробивного тока и других побочных эффектов. Для КЈ отношение $\frac{\Delta W}{W_{pew.}} = 0,15 \div 1,5$, что совпадает

с результатами для NaCl. Измеряемая энергия является суммарной энергией, поглощаемой при пробое твердого диэлектрика. Как показали опыты, энергия, затрачиваемая на пробой монокристаллов NaCl и KJ, по порядку величины равна энергии решетки, отнесенной к разрушенному объему соответствующей соли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Под ред. проф. Л.И. Сиротинского. Техника высоких напряжений, ч. І, Гостех-издат, стр. 37, 1951.

2. То же, стр. 14. 3. Б. М. Гохберги Э. Я. Зандберг. ДАН СССР, 53, 515, 1946. 4. Б. М. Гохберг. Изв. АН СССР (сер. физ.), 10, 125,1946.

Томский политехнический институт