

Член-корреспондент АН СССР В. В. РЖЕВСКИЙ, Н. И. АНДРИЕНКО,  
Д. М. МИГУНОВ, Ю. И. ПРОТАСОВ

### О ПОВЕРХНОСТНОМ ПРОБОЕ

Известно, что если электроды, находящиеся в газе, касаются твердого тела (т. е. замыкаются твердым телом) — диэлектрика или полупроводника, то при подаче напряжения на электроды пробивается газ, но развивается пробой по границе сред. Это явление назовем поверхностным пробоем.

Если электроды разнести на значительное расстояние, больше  $L_k$ , то пробой происходит по твердому телу. Это явление кажется удивительным, однако оно становится понятным, если учесть, что электрическое поле в твердом теле пространственно резко неоднородно, поскольку электроды касаются твердого тела в «точке» — по весьма малой поверхности; при увеличении расстояния между электродами в твердом теле увеличивается ток, поскольку увеличивается сечение, по которому идет ток; вследствие неравномерности поля под электродами увеличивается электропроводность твердого тела как из-за высокой напряженности поля, так и от увеличения температуры в контакте. Электрическое поле в газе неоднородно лишь в сечении, перпендикулярном электродам. Если считать, что как нагрузка две среды включены в цепь электродов параллельно, то сопротивление нагрузки равно:

$$R^{-1} = \pi L / 8\rho + (BL)^{-1}, \quad (1)$$

где первое слагаемое относится к твердому телу, второе — к газу;  $R$  — сопротивление нагрузки на электродах;  $\rho$  — удельное сопротивление твердого тела, являющееся функцией напряженности поля и температуры;  $\pi/8$  учитывает неравномерность поля (<sup>1</sup>);  $B$  — коэффициент, учитывающий сопротивление газа между электродами и неравномерность поля в газе;  $L$  — расстояние между электродами.

Критическое расстояние определяется из условия равенства сопротивлений двух сред

$$L_k = (8\rho / \pi B)^{1/2}. \quad (2)$$

При  $L < L_k$  пробой происходит по газу, при  $L > L_k$  — по твердому телу.  $B$  определялось экспериментально. Неоднородное поле приводит к тому, что среда, примыкающая к электродам, теряет электрическую прочность, что и приводит к пробоем. В твердом теле под электродами образуется канал пробоя, имеющий малое сопротивление, являющийся практически проводником, по которому идет основная доля тока. Канал развивается от электродов и заглубляется в твердое тело. На канал воздействует сила, пропорциональная напряженности поля и току, проходящему в канале. В результате воздействия этой силы канал пробоя загибается, соединяя электроды. Данная картина наблюдается как при тепловом, так и при электрическом пробое.

Процесс пробоя описывается уравнением:

$$\pi cr^2 m T + \frac{U^2 ik}{R(L-2l)} - \frac{4\pi m r^3}{3} \frac{d^2 l}{dt^2} = 0, \quad (3)$$

где  $U$  — напряжение на электродах,  $t$  — время действия напряжения;  $R$  — сопротивление твердого тела между электродами,  $l$  — длина канала

пробоя;  $r$  — радиус канала пробоя;  $m$  — плотность среды в канале;  $k$  — коэффициент, учитывающий неоднородность поля в твердом теле;  $T$  — температура плавления;  $c$  — удельная теплоемкость.

Решение уравнения (3) определяет длину канала пробоя в твердом теле, однако практический интерес представляет максимальная величина заглублиения канала в твердое тело. Для граничных и начальных условий, соответствующих расположению электродов на границе полупространства, разделяющей твердое тело и газ, получено

$$h = E^2 L^3 t / 48 \rho m c r^2 T k, \quad (4)$$

где  $h$  — максимальное удаление канала пробоя от границы полупространства,  $E$  — электрическая прочность твердого тела.

Экспериментальное изучение поверхностного пробоя проводилось на различных диэлектриках и полупроводниках, причем размеры образцов относительно параметров канала принимались такими, что удовлетворялись граничные условия, описанные выше. Электроды устанавливались на плоскости, разделяющей полупространства, заполненные данным диэлектриком и воздухом. На электроды

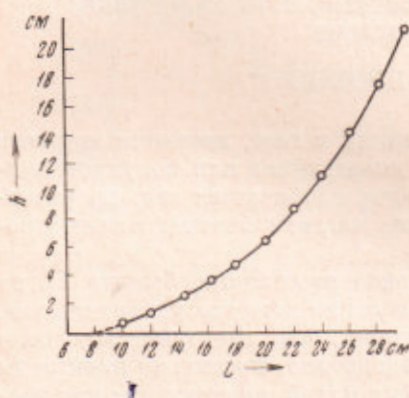


Рис. 1. Заглублиение канала пробоя  $h$  в зависимости от расстояния между электродами  $L$

подавалось напряжение в течение различного времени, причем напряжение увеличивалось до пробоя той или другой среды. Изменяя  $L$  от минимума до возможной величины (при условии сохранения граничных условий), получали или пробой по воздуху, или по твердому телу. Измеряя  $h$ , строили зависимость  $h$  от  $L$ .

Типичная экспериментальная зависимость для поликристаллического NaCl показана на рис. 1.  $L_{к}$  для поликристаллического NaCl колеблется от 8 до 10 см. Пробой производился напряжением частотой в 50 гц при времени воздействия напряжения 1 сек. Уменьшение времени воздействия напряжения приводит к уменьшению заглублиения канала пробоя в твердое тело. Некоторые диэлектрики с высокой электрической прочностью не удалось пробить с поверхности в воздухе, однако расчеты показывают, что возможно пробить любые диэлектрики, если увеличить  $L$  и  $t$ .

Поступило  
1 IV 1970