

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОБОЕ ИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

В. Д. Кучин

(Представлено профессором, доктором А. А. Воробьевым)

Теории пробоя ионных кристаллов дают пока очень ограниченные и весьма ориентировочные данные о некоторых физических процессах, протекающих при пробое (например, время и скорость развития разряда и др.) и тем более об их изменении в зависимости от изменения внешних по отношению к кристаллу условий (температуры, степени перенапряжения и т. д.). Экспериментальные данные по этим процессам малочисленны из-за трудностей в постановке опыта, так как пробой протекает в незначительном объеме кристалла (10^{-4} см³) и при ультракоротких временах (порядка 10^{-8} — 10^{-9} сек).

Принято считать, что электрический пробой твердых диэлектриков — электронный процесс. Поэтому некоторые авторы считают, что время запаздывания разряда в общем случае складывается из двух составляющих: статистического времени запаздывания и времени формирования разряда.

Так, Штригель [1], Инуиши и Суита [2] бездоказательно по аналогии с газами разделяют время запаздывания разряда в твердых диэлектриках на две составляющие. Зейтц [3] указал, что в каждом отдельном случае для разрушения диэлектрика нужна лавина электронов определенной величины. Для разрушения кристалла NaCl толщиной 1 см, по Зейтцу, требуется 10^{12} электронов. Появление такой лавины при данном поле F имеет некоторую вероятность β . Величину $1/\beta$ Зейтц считает статистическим временем запаздывания разряда. Вероятность появления лавины β зависит от вероятности появления свободного электрона ν . Так как величина ν в настоящее время неизвестна, то Зейтц не указывает величины статистического времени запаздывания.

Существование статистического времени запаздывания разряда в твердых диэлектриках ставится некоторыми исследователями под сомнение. Данных, позволяющих отметить начало формирования разряда, к сожалению, пока еще нет. Уайтхед [4] считает, что в реальных ионных кристаллах всегда имеется некоторое количество свободных электронов вследствие поглощения различных излучений, тепловых колебаний и наличия дефектов в кристаллах. Подтверждение этому можно видеть в опытах Вальтера и Инге [5] и Воробьева [6], которые получили одинаковую прочность рентгенизованной и нерентгенизованной каменной соли при малых временах. Эти опыты показывают, что число электронов перед пробоем не должно иметь большого влияния на процесс формирования разряда.

Кроу [7] указывает, что при пробое предельно очищенных жидкостей (гексан, гептан, октан и др.) статистическое время запаздывания разряда отсутствует, потому что при полях выше $1 \cdot 10^5$ в/см холодная эмиссия с катода является хорошим поставщиком электронов. В [8] указывается, что для холодной эмиссии с катода требуется поле напряженностью 300 кв/см. Можно считать, что при полях $1 \cdot 10^6$ в/см и выше она

также должна быть. Возможно также, что при этих полях имеется электростатическая ионизация. Оба вида ионизации являются причиной появления свободных электронов в диэлектрике.

Следовательно, в ионных кристаллах статистическое время запаздывания практически отсутствует и за время разряда можно принять время формирования разряда.

Уайтхед [4] определил скорость электрона перед актом ионизации с $E=I=10$ эв равной $v=1,88 \cdot 10^8$ см/сек, а время необходимое для достижения этой скорости в поле F , равно $t_1=1,07 \cdot 10^{-7}/F$ сек. Для поля $F^*=10^7$ в/см $t_1=10^{-14}$ сек. При этом длина свободного пробега электрона $\lambda > 10^{-6}$ сек. По Фрелиху, время, в течение которого средний электрон имеет наименьшую длину свободного пробега (при пробое) $t_p = t_1 e^{t/\tau}$, где τ — время между двумя столкновениями электрона. Если $\tau = (10^{-13} — 10^{-15})$ сек, то $t_p \cong 2 \cdot 10^{-10}$ сек. По расчетам Симпсона [9], также не учитывающего статистического времени разряда, $t_p = (5 \cdot 10^{-10} — 5 \cdot 10^{-12})$ сек. Из осциллограмм Вальтер и Инге [10] нашли, что время развития разряда в ионных кристаллах составляет $3 \cdot 10^{-8}$ сек.

Зная время формирования разряда, можно определить среднюю скорость распространения разряда как $\bar{v} = \bar{d}/t_p$, где \bar{d} — средняя толщина образцов в месте пробоя. Так, по расчетам Симпсона [9] для $d = 10^{-2}$ см имеем $v = (5 \cdot 10^8 — 5 \cdot 10^{10})$ см/сек. По теории Фрелиха [11] средняя скорость свободных электронов $v = EF\tau/2m \cong 0,9 \cdot 10^{15} F\tau$. Для значений F^* и τ , принятых выше, $v = (10^7 — 10^9)$ см/сек, что дает $t_p = (10^{-9} — 10^{-10})$ сек. В действительности время разряда в ионных кристаллах больше, так как теоретические расчеты не учитывают время, которое требуется для распространения лавины электронов по толще диэлектрика.

Хиппель и Алжер [12], Воробьев [6], Кучин [13] и Воробьев и Кучин [14] получили увеличение электрической прочности ионных кристаллов при временах воздействия напряжения короче 10^{-7} сек. Мы считаем, что статистическое время запаздывания разряда в ионных кристаллах отсутствует, а увеличение F^* на импульсах короче 10^{-7} сек объясняется запаздыванием разряда. Опыты Инуиши и Суита [15] и Сончика [16] по пробое твердых диэлектриков на прямоугольных импульсах убедительно показали, что в твердых диэлектриках существует время запаздывания разряда.

Воробьев [6] подсчитал время и скорость формирования разряда для щелочногалоидных кристаллов в предположении, что статистическое время запаздывания разряда отсутствует.

Время развития разряда определялось из осциллограмм как время, в течение которого напряженность внешнего электрического поля на образце изменяется от F_0^* до F_t^* , где F_0^* — электрическая прочность данного диэлектрика при таком времени воздействия напряжения, при котором еще не наблюдается запаздывания разряда (в нашем случае за F_0^* бралась электрическая прочность при времени воздействия напряжения порядка $(10^{-6} — 10^{-7})$ сек, а F_t^* — электрическая прочность того же диэлектрика при времени воздействия напряжения $(1,2 — 3,1) \times 10^{-8}$ сек. Предполагалось при этом, что формирование разряда начинается тогда, когда напряженность поля в диэлектрике достигает пробивной величины при времени воздействия напряжения порядка $(10^{-6} — 10^{-7})$ сек.

Пользуясь полученными данными по временной зависимости электрической прочности NaCl, KCl, KBr и KJ [13], определим время и скорость развития разряда и их изменения с изменением температуры.

На рис. 1 приведено изменение времени, а на рис. 2 — изменение скорости формирования разряда в зависимости от температуры для кристаллов NaCl, KCl, KBr и KJ. Если учесть приближенность расче-

тов, то согласие полученных данных t_p и v с выводами из теории Фрелиха следует считать удовлетворительным.

Величины v совпадают также с данными Воробьева и Сончика. Найденное значение v для KCl значительно выше, чем у Инуиши и Суита. При времени воздействия напряжения $(1,2-3,1) \cdot 10^{-8}$ сек время развития разряда уменьшается, а средняя скорость разряда увеличивается с уменьшением энергии кристаллической решетки во всем исследованном интервале температур. Как и в [6, 13], для KCl наблюдается некоторое отклонение от прямой пропорциональности: значения F^* и t получаются несколько завышенными.

Приведенным на рис. 2 зависимостям можно дать следующее объяснение. С увеличением температуры растет постоянная кристалличе-

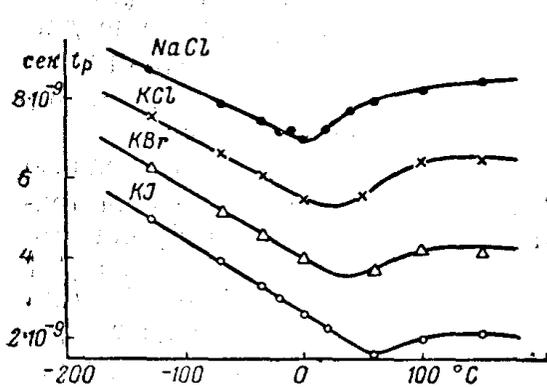


Рис. 1. Зависимость времени формирования разряда в кристаллах NaCl, KCl, KBr и KJ от температуры.

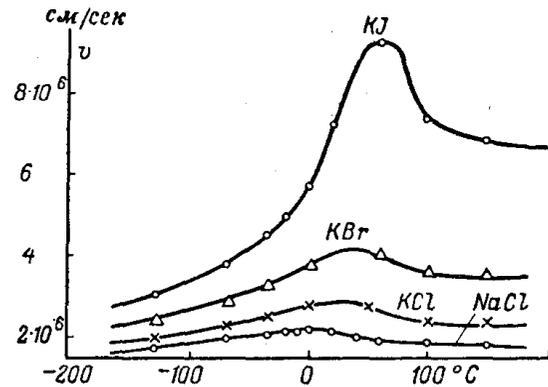


Рис. 2. Зависимость скорости формирования разряда в кристаллах NaCl, KCl, KBr и KJ от температуры.

ской решетки, следовательно, растет и длина свободного пробега электрона. Поэтому с ростом температуры скорость развития разряда должна увеличиваться, что и наблюдается в действительности. Однако с увеличением температуры выше T_c резко возрастают тепловые колебания ионов, что приводит к снижению скорости формирования разряда. Максимум скорости v соответствует критической температуре T_c ионного кристалла. С уменьшением энергии кристаллической решетки максимум скорости формирования разряда смещается в сторону больших температур.

Литература

1. Strigel R., Elektrische Stossfestigkeit, Berlin, 1939.
2. Inuishi Y. and Suita T., J. Phys. Soc. Japan, 9, 431, 1954.
3. Seitz F., Phys. Rev., 76, 1376, 1949.
4. Whitehead S., Dielectric Breakdown of Solids, Oxford, 1951.
5. Вальтер А. Ф. и Инге Л. Д., ДАН СССР, 2, 65, 1934.
6. Воробьев Г. А., Изв. ТПИ, 91, 79, 1956.
7. Crowe R. W., J. Appl. Phys., 27, 155, 1956.
8. Под. ред. Сиротинского Л. И., Техника высоких напряжений, ч. 1, ГЭИ, 1951.
9. Simpson J. H., ERA Report L/T178, 1947.
10. Вальтер А. Ф. и Инге Л. Д., Физика диэлектриков, ГТТИ, 1932.
11. Fröhlich H. and Simpson J. H., Advances in Electronics, New York, 2, 185, 1950.
12. Hippel A. and Alger R. S., Phys. Rev., 76, 127, 1949.
13. Кучин В. Д., Доклад на Всесоюзной конференции по физическим свойствам твердых и жидких диэлектриков, Днепропетровск, 1956.
14. Воробьев Г. А. и Кучин В. Д., Изв. ТПИ (в настоящем выпуске).
15. Inuishi Y. and Suita T., J. Inst. El. Eng. Japan, 74, 150, 1954.
16. Сончик К. К., Доклад на Всесоюзной конференции по физическим свойствам твердых и жидких диэлектриков, Днепропетровск, 1956.