

А. К. КРАСИН

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 27 VI 1940)

§ 1. Анализ вопроса об электрическом пробое твердых диэлектриков. В результате анализа существующих теоретических взглядов на электрический пробой твердых диэлектриков и сопоставления теории с экспериментом автор пришел к следующим выводам:

1. Опытные данные и общие соображения Хипшеля ⁽¹⁾ и др. убедительно говорят за то, что в основе электрического пробоя лежит электронный процесс.

2. Изучая электрическую прочность монокристаллов на образцах в виде пластинок с полусферической выемкой, автор нашел следующие данные для некоторых щелочно-галлоидных солей.

Вещество	Количество образцов	Максимальная пробивная напряженность поля в миллионах V/cm	
		выемка положительная	выемка отрицательная
NaCl	51	1,7	1,7
KCl	13	1,1	1,1
KBr	4	0,8	—
KJ	13	0,5	0,5

Пробой производился при постоянном напряжении.

Полученные автором максимальные значения пробивных полей щелочно-галлоидных солей близко подходят к соответствующим результатам Хипшеля, полученным на пробое пластинок при специальных электродах.

3. Из имеющихся теорий опытный материал ближе всего отражает теория ударной ионизации электронами, но и она оказывается недостаточно общей, как только появляется попытка распространить ее на разнообразные по своей структуре объекты.

4. Основной недостаток теорий кроется в том, что не рассмотрена конечная стадия пробоя. Теории электрического пробоя построены, как

теории образования электронной лавины, и не затронут вопрос, каким образом электронная лавина приводит вещество к разрушению, не дано конкретного анализа взаимосвязи отдельных моментов, создающихся в веществе, в поле, близком к пробивному. Не дано анализа условий конечного качественного скачка, составляющего пробой.

5. Общность явления электрического пробоя для различных диэлектриков состоит в развитии электронного лавинообразного процесса, но конечная стадия пробоя—разрушение решетки—в объектах различной структуры и свойств происходит с индивидуальными для данной структуры особенностями.

6. Завершение электрического пробоя, в виде проплавления решетки, не является очевидным и не имеет под собой достаточных физических оснований.

7. Теория электрического пробоя твердых изоляторов получит сдвиг вперед, если будет дан анализ развития конечной стадии пробоя, анализ тех качественных новых условий, которые создаются электрическим полем большой напряженности и которые приводят вещество к разрушению.

На связь пробивной напряженности поля и ионных параметров решеток наглядно указал Воробьев⁽²⁾, придя к выводу, что энергия решетки и пробивная напряженность поля тесно связаны между собою. Анализ Воробьева⁽²⁾ и автора⁽¹⁾ состояния вопроса об электрическом пробое твердых диэлектриков шел по несколько различным путям и привел к близким результатам, что обоюдно подтверждает правильность рассуждений.

§ 2. Путь решения вопроса об электрическом пробое твердых диэлектриков. В качестве решения вопроса о последнем моменте пробоя автор высказывает следующее предположение.

При достаточно большой напряженности электрического поля, уже весьма близкой к пробивной, в изоляторе начинается процесс ударной ионизации электронами, который дает значительное увеличение электронного тока, возрастающего не равномерно по всему объему тела, а преимущественно в каких-то локальных областях, наиболее предрасположенных к развитию ионизационных процессов. Развитие ударной ионизации в поле большой напряженности ведет не только к появлению новых свободных электронов, но и сопровождается направленностью движения этих электронов. Появление большого числа движущихся электронов в изоляторе вызывает уменьшение сил связи узловых частиц решетки, которое приводит к тому, что существующее к этому моменту электрическое поле в веществе, вызвавшее в нем электронный ток, оказывается способным окончательно нарушить уже измененную электронами связь заряженных тяжелых частиц тела и привести твердую структуру к разрушению.

Высказанное предположение напоминает в некоторых чертах теорию электростатического разрыва решетки, но, неся в себе черты этой теории, оно коренным образом отличается от старых представлений, имея основным положением поляризующее действие электронного тока.

Одно пробивное поле, без ослабляющего действия на силы связи тяжелых частиц электронного потока, которое оно само породило, не могло бы разрушить решетки, но при совокупном действии этих сил разрушение решетки полем становится возможным.

Ниже приводится небольшой числовой пример, иллюстрирующий реальную возможность высказанного предположения, но прежде чем перейти непосредственно к расчету, необходимо оговорить следующее положение.

В пробитом образце место разрушения всегда оказывается в виде канала, причем разрушению подвергается наиболее слабая часть образца.

При желании провести некоторый подсчет с током надо помнить, что при пробое в критическом положении оказывается не весь кристалл, а только какая-то небольшая его часть, которая и становится впоследствии каналом пробоя.

Выберем в качестве канала, в котором разворачивается картина пробоя, часть кристалла с размерами $10^3 \times 10^3 \times 10^5$ частиц решетки. Этот объем достаточно мал по сравнению с образцом, но достаточно велик, чтобы отразить структурные особенности данной кристаллической системы. Допустим, что вследствие ионизационного процесса вначале возникнут свободные электроны в количестве 1 электрон на 10 частиц решетки. Тогда в рассматриваемом объеме образуется 10^{10} свободных электронов. Если на каждые 10 ионов решетки, например для NaCl, имеется 1 свободный электрон и, кроме того, каждый электрон оторвался от какого-то иона, то это значит, что на каждые 4—5 ионов имеется либо нейтральный атом, либо лишний электрон. Можно ожидать, что в таких условиях решетка NaCl в поле $1,5 \cdot 10^6$ V/cm не сможет быть в равновесии и окажется разорванной полем.

При ионизационном процессе в NaCl указанное количество электронов при поле $1,5 \cdot 10^6$ V/cm может получиться, если только 5—6% всех освобождающихся электронов будут производить дальше ионизацию. Скорости ионизирующих электронов велики, а скорости свободно движущихся электронов, образующих ток, гораздо меньше. Рассчитывая величину тока в канале, можно не принимать в расчет подвижности электронов, не являющейся характерной для электронов, производящих ионизацию.

Для подвижности электронов в NaCl имеются данные Стасова и Смакула для температур 600—700°, приведенные в работе Арцыбышева⁽³⁾. С несколько произвольной экстраполяцией данных Стасова и Смакула в область комнатных температур можно принять, что подвижность электронов в NaCl будет $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ см²/сек., что даст среднюю скорость электронов в поле $2 \cdot 10^6$ V/cm $v = 50$ см/сек. Для этого случая ток в канале получается $I = 3 \cdot 10^{-5}$ А.

Считая время пробоя $\tau = 10^{-8}$ сек., получим, что взятый нами для расчета канал в NaCl нагреется за время пробоя всего лишь на 400°.

Таким образом получаем, что если разобранный нами ионизационный процесс прошел, то при создавшемся совершенно ненормальном состоянии решетки выделившееся тепло еще не в состоянии расплавить самый канал. Нельзя, конечно, считать, что приведенный элементарный пример доказывает высказанное предположение о ходе процесса электрического пробоя, но основную ориентацию он дает. Необходимо произвести расчет затронутого в примере случая более строго, что сможет более полно подтвердить правильность высказанной идеи.

Автор приносит благодарность П. С. Тартаковскому и А. Ф. Вальтеру за полезные советы и обсуждение материала и А. А. Воробьеву за предложение темы по пробоям щелочно-галогидных кристаллов.

Высоковольтная лаборатория
Сибирского Физико-технического института
при Томском государственном университете
им. В. В. Куйбышева

Поступило
1 VII 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ A. Hippel, Journ. of Appl. Phys., 8, 815 (1937). ² А. А. Воробьев, Труды СФТИ, 5, 234 (1939). ³ Арцыбышев, Труды Физического института Академии Наук СССР, I, вып. 3, 5 (1938).