

## ОБСУЖДЕНИЕ ДОКЛАДОВ

Г. И. Сканави говорит:

У присутствующих возникает представление о существовании двух направлений в изучении электрического пробоя, одно из которых развивается в Томском политехническом институте, а другое—в ФИАНе, о существовании двух направлений говорить нельзя, так как их не существует.

За прошедшее время изучением электрического пробоя занимались гораздо меньше, чем следовало бы. Возник ряд теорий электрического пробоя, проведен ряд исследований, с которыми нельзя не считаться (работы Хиппеля и др.). Приступая к изучению электрического пробоя, необходимо разобраться в современном состоянии вопроса. Из многих существующих теорий нужно отобрать более правильные, более вероятные. Не подлежит, видимо, сомнению, что пробой начинается с ударной ионизации, но это только интуитивное убеждение. Экспериментального доказательства того, что пробой начинается с ударной ионизации в твердом диэлектрике, как в газе, не существует. Доказательством существования ударной ионизации могла бы быть опытно полученная кривая зависимости тока от толщины диэлектрика. Не всякая электронная лавина ведет к пробое. Как изменяется ток перед пробоем? Существуют ли предпробивные лавины? Необходимо провести цикл работ с целью непосредственными опытами показать наличие ударной ионизации.

Существуют предположения о том, что имеются такие механизмы, как холодная эмиссия электронов, термическая ионизация, туннельный эффект; просто отбросить эти механизмы, не доказав несостоятельность их, нельзя. В какой мере вероятны эти процессы? Вероятность этих механизмов нужно проверить на опыте так же, как и выяснить зависимость  $E_{np}$  от температуры и толщины.

Поставив исследование зависимости электрической прочности стекла и слюды от толщины диэлектрика и времени приложения напряжения (длительности импульса), стремились исследовать начало процесса ионизации и пробоя.

Работы А. А. Воробьева и его сотрудников интересны, но не решают вопроса об электрическом пробое. Какой смысл в сопоставлении  $E_{np}$  с характеристиками вещества, между собою также связанными? Зависимость  $E_{np}$  от всевозможных физико-химических свойств существует, но для ее физического обоснования необходимо сначала твердо разобраться в условиях возникновения пробоя, в механизме пробоя, в самом начале пробоя.

Тепловой пробой характеризуется расходуемой энергией, которую легко подсчитать. В случае электрического пробоя начальная стадия—ударная ионизация. Энергия, необходимая для ионизации атомов в объеме канала, определяется числом атомов в этом объеме и энергией, необходимой для ионизации каждого атома. Энергия, необходимая для второй стадии пробоя, определяется каким-то образом энергией решетки, но не равна ей. О соотношении этих энергий нельзя судить, пока не будет изучена детально первая стадия пробоя. Постановка вопроса об энергии пробоя важна, интересна, но экспериментально трудно разрешима. Имеет большое значение хотя бы грубая оценка механизма второй стадии пробоя, выяснение роли электронной лавины, роли дефектов, всегда имеющих в реальном кристалле.

В. Д. Кузнецов говорит, что ранее он не предполагал о существовании связи таких величин, как электрическая прочность, механическая прочность, поверхностная энергия кристаллов диэлектриков. Однако опыты показали наличие такой связи. А. А. Воробьев, ранее изучавший механи-

ческие свойства материалов, теперь изучает электрические свойства, связывая их с механическими. К. А. Водопьянов изучает диэлектрические потери в диэлектриках и также обнаруживает связь потерь с механическими свойствами кристаллической решетки. На разрушение кристаллической решетки затрачивается энергия, но энергия пропорциональна поверхностной энергии, следовательно, сопоставление электрической прочности с поверхностной энергией имеет смысл. При изучении вопроса о разрушении решетки следует экспериментально исследовать многие стороны явления, но необходимо параллельно решать задачу и теоретически.

Подсчет энергии решетки произведен для идеальных кристаллов, исследователи же работают с реальными кристаллами, свойства которых отличаются от свойств идеальных. Необходимо учитывать дефекты, имеющиеся в реальных кристаллах.

На основании опытных данных об электрической и механической прочности щелочно-галлоидных кристаллов должны быть получены данные для построения правильной теории кристаллической решетки. Невозможно строить теорию кристаллической решетки только для механических или только для электрических свойств кристаллов. При электрическом и механическом разрушениях образуются новые поверхности, вид которых одинаков, следовательно, к решению вопроса о механическом разрушении и электрическом пробое нужно подходить с общих позиций.

Ранее все непонятные явления объясняли наличием примесей, которые оказывались необнаруживаемыми. Роль примесей действительно необходимо выяснить. Так, А. М. Трубицин вводил определенную примесь и этим менял как электрическую, так и механическую прочность смешанных щелочно-галлоидных кристаллов. Это важно для выяснения путей получения веществ с определенными свойствами.

Общей задачей на дальнейшее должно быть—получение совершенно чистых кристаллов без дефектов и на основании опытного исследования их свойств—определение энергии решетки, а затем построение всей теории кристаллической решетки.

Исследователи электрических свойств диэлектриков уделяют недостаточное внимание теории кристаллической решетки и это затрудняет решение задачи об электрическом пробое. Электрические свойства необходимо связать с теорией кристаллической решетки. Теорию кристаллической решетки нужно бы ввести как обязательную учебную дисциплину на некоторых специальностях Томского политехнического института и Томского государственного университета.

А. А. Воробьев. Работой Коноровой Е. А. внесена экспериментальная ясность в отношении электрических свойств слюды в тонком слое (зависимость  $E_{пр}$  от  $d$  на постоянном напряжении отсутствует, на импульсном же напряжении—существует).

Изучение электрической прочности материалов в тонком слое дает противоречивые данные. В одних работах устанавливается наличие упрочнения в тонком слое, другими исследователями устанавливается отсутствие упрочнения.

Очевидно, явление пробоя в тонком слое диэлектрика сложно; нет оснований не верить опытным данным. Действительно возможно, что существует и упрочнение материала в одном случае и отсутствует упрочнение в другом. Подобные противоречивые данные, возможно, получаются потому, что сказываются в большей или меньшей степени такие явления, как эмиссия из катода, вторичная электрическая эмиссия, поляризация. Например, NaCl выдерживает огромные электронные токи без разрушения. При исследовании диэлектриков в тонком слое необходимо учитывать и иметь в виду не только процессы ударной ионизации, но и эмиссию из

катода, вторичную электрическую эмиссию и поляризацию. Изучая электрическую прочность материала в тонком слое, необходимо измерять и токи.

Г. А. Воробьев в лаборатории Томского политехнического института снял надежную вольтамперную характеристику на постоянном и импульсном напряжениях, получил семейство кривых в большом интервале времен для 4 солей. Эти кривые дают прочное доказательство существованию связи электрической прочности с энергией кристаллической решетки.

Г. И. Сканави говорит о том, что новые связи, отыскиваемые нами (связь  $E_{пр}$  с энергией решетки и другими характеристиками вещества), вряд ли дадут новый материал для решения вопроса об электрическом пробое диэлектриков. С этим утверждением нельзя согласиться, так как энергия решетки—универсальная величина, выражаемая через заряд частиц, из которых построена решетка, через валентность, ионов и др. величины, определяющие химические связи частиц, электрическую и механическую прочность материала.

Связи термодинамических характеристик и свойств вещества необходимо отыскивать и раскрывать. Г. И. Сканави считает, что изучать явление электрического пробоя необходимо с начала процесса ударной ионизации. Однако, прямых опытных данных о том, что пробой начинается с ударной ионизации, не существует. О начале электрического пробоя экспериментальных данных нет. Все теории рассматривают рост, электропроводности, потерю электрической прочности, но не разрушение. О конце явления пробоя существуют реально измеренные данные (электрическая прочность  $E_{пр}$ ). Картина начальной стадии разрушения, начала пробоя может стать ясной позднее, после получения достаточного числа данных о конце процесса пробоя.

Идея связи электрической прочности и энергии решетки еще только начинает нами развиваться и может оказаться полезной; работы в этом направлении будем продолжать.

Рассматривая явление пробоя в жидкостях и газах, необходимо учитывать межмолекулярные и внутримолекулярные связи. Какие связи разрываются при пробое? Работой А. Ф. Калганова показано, что разрываются межмолекулярные связи.

В явлении пробоя газа основное значение имеет ударная ионизация. В сжатом газе явления усложняются; картину пробоя в них нужно рисовать обязательно с учетом химических взаимодействий. Межмолекулярные связи могут иметь решающее значение.

Так как при электрическом пробое разрываются межмолекулярные связи, то необходимо отыскивать материалы с сильными межмолекулярными связями. Эти материалы должны обладать высокой электрической прочностью.

Поиски веществ с сильными межмолекулярными связями—важная техническая задача.

В. А. Преснов говорит следующее: Г. И. Сканави считает, что двух направлений в изучении явления пробоя нет, однако впечатление другое. У работников физического института АН СССР твердое убеждение в том, что пробой начинается с ударной ионизации. Томские исследователи считают, что это не является твердо установленным экспериментальным фактом, что ясности в механизме пробоя нет, но твердо установленной является связь  $E_{пр}$  с энергией решетки.

Теория ударной ионизации—не новая теория. Из теории ударной ионизации А. Ф. Иоффе развилась теория Хиппеля. Опыты Иоффе показали, что электрическая прочность не зависит от концентрации начальных электронов, что фотоэлектроны как будто не участвуют в явлении пробоя и

тогда сомнительно, что пробой вызывается ударной ионизацией электронами производимости.

Слабым местом в работах Томского политехнического института является то, что нет картины механизма пробоя. Не решен вопрос о том, в результате какого акта происходит разрушение диэлектрика. Может быть ответственными за пробой являются не только электроны, но и ионы, которые могут находиться как в стабильном, так и в метастабильном состоянии, отличающимся глубиной потенциальной ямы. Энергия активизации ионов—разность энергетических уровней. Налагая электрическое поле, уменьшаем энергию активизации, т. е. создаем условия для изменения концентрации ионов в стабильном и метастабильном состояниях, статистическое равновесие нарушается, возникают нарушения в решетке. Разрушение диэлектрика может произойти за счет выхода ионов из стабильных состояний. Такой механизм нарушения обязательно связан с энергией решетки.

Правильная теория электрического пробоя не может рассматривать только поведение электронов, необходимо рассматривать поведение и ионов.

Е. А. Конорова говорит, что теория ударной ионизации не опровергается экспериментально установленной независимостью электрической прочности от концентрации начальных электронов. Впечатление некоторых о том, что теория ударной ионизации развивается в отрыве от теории строения кристаллической решетки, неверны. Теории ударной ионизации наоборот, основаны на теории строения кристаллической решетки (Зейтц, Хиппель). Изучать электрические явления в диэлектриках необходимо на основе изучения физики твердого тела, в связи с энергией решетки.

Результаты работы по определению энергии пробоя очень интересны, хотя кажутся и не очень убедительными. В докладе указано, что диаметр канала пробоя зависит от толщины образца, а энергия—нет. Это кажется странным. Сопротивление канала пробоя конечно. Если длина канала больше, то и сопротивление больше, а проводимость меньше. Почему же не зависит энергия пробоя от размеров канала? Зависимость между размерами канала и измеренной энергией должна быть специально изучена. Просмотр под микроскопом канала пробоя недостаточен. Возможно, что существует различие в величине канала и различие в энергии, но это различие не обнаружено из-за большого разброса полученных значений.

В. А. Чуенков отмечает следующее:

1. Опыты А. К. Красина, показавшие независимость пробивной напряженности от материала катода, говорят, как нам кажется, о том, что катодная эмиссия не оказывает существенного влияния на электрический пробой твердых диэлектриков.

2. На развитие канала пробоя существенное влияние оказывает объемный заряд положительных ионов, образующийся в результате развития электронной лавины. Без учета тормозящего действия объемного заряда положительных ионов плотность электронов в головке лавины достигла бы значения, большего, чем  $10^{23} \text{ см}^{-3}$ , что не имеет смысла.

3. Рядом товарищей было высказано сомнение о целесообразности изучения первой стадии электрического пробоя, т. е. стадии нарушения электрической прочности. С этим трудно согласиться. Величина напряженности электрического поля, при которой происходит нарушение электрической прочности, является важной характеристикой диэлектрика, ибо при  $E = E_{пр}$  электропроводность возрастает скачком до очень больших значений и диэлектрик теряет свои диэлектрические свойства.

Без изучения явления нарушения электрической прочности, являющегося началом пробоя и вместе с тем причиной, обуславливающей протекание всех последующих процессов, невозможно понять механизм разрушения диэлектрика при электрическом пробое.

М. П. Тонконогов говорит, что теория электрического пробоя сильно отстает от экспериментальных данных. Теории электрического пробоя охватывают отдельные стороны процесса. Работа Чуенкова ценна тем, что в ней рассматривается общее кинетическое уравнение. Решение общего кинетического уравнения—правильный путь решения задачи об электрическом пробое. Но решать это уравнение следует для конкретной структуры. Нужно, зная зависимость электропроводности от напряженности поля, найти условия нарушения устойчивого режима. Зависимость тока от напряженности поля не исчерпывает механизма электрического пробоя. Мысль Красина о том, что связь ионов уменьшается в результате роста электронной лавины, заслуживает внимания.

Однако то, что ионные связи могут быть ослаблены электронным током, в широкой постановке вопроса не рассматриваются.

Большое количество экспериментальных данных, полученных в Томском политехническом институте, могут дать основу для расчета теории электрического пробоя, для определения констант, входящих в теорию.

А. А. Воробьев говорит, что работа А. Ф. Калганова представляет интерес для практики.

Электрический пробой сопровождается разрушением материала. Мощные электрические искры используются для разрушения (например, можно применить при поисках полезных ископаемых). Какой мощности источник требуется для этого? Работа А. Ф. Калганова показывает, что при электрическом способе разрушения затрачивается меньше энергии, чем при механическом разрушении, когда большая часть энергии расходуется не на участке, подвергаемом разрушению. Работа носит разведывательный характер, исследование будет дополнено осциллографированием.

Относительно механизма взаимодействия электронов с решеткой сказать определенного ничего не можем, этот механизм не вскрыт, неизвестен.

В. И. Оделевский говорит, что, установив связь электрической прочности и энергии решетки, не следует рассматривать связь  $E_{пр}$  со многими величинами. Энергия решетки находится в прямой связи с величиной  $h\nu$ , эта связь указывает на физический механизм взаимодействия и является основной, а остальные—производными и несущественными.

Неправильно считать, что критерий пробоя следует перенести из первой стадии пробоя во вторую. Критерий пробоя должен быть в первую стадию так как в этой стадии происходит потеря электрической прочности, и нарушение стационарного режима.

---

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
5	15 сверху	Зинерман	Зингерман
9	2 снизу	пробивкой напряженности	пробивной напряженностью
13	4 сверху	$\varepsilon_m \cong 4 \frac{h}{2\pi}$	$\varepsilon \cong 4 \frac{h}{2\pi} \omega$
24	подпись под рисунком	рис.	рис. 9.
50	14 сверху	$\frac{1}{M_L^{ак}} = \left\{ \frac{1}{M} \right.$	$\frac{1}{M_L^{ак}} = \left\{ \frac{1}{M_-} \right.$
53	10 сверху	$\frac{df^{1/2}}{d\varepsilon}$	$\frac{df^{1/2}}{d\varepsilon}$
57	5 сверху	$\left( 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{1,3\varepsilon}} e^{-\frac{q}{E}(\varepsilon - I)^2} \right)$	$\left( 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{1,3\varepsilon}} \right) e^{-\frac{q}{E}(\varepsilon - I)^2}$
64	Уравнение (87)	$l_2(\varepsilon_2, \varepsilon_1) = l_1 e^{-\frac{1}{l_0}}$	$l_2(\varepsilon_2, \varepsilon_1) = l_1 e^{-\frac{l_1}{l_0}}$
65	18 снизу	$I \div 2\varepsilon_p$	$I + 2\varepsilon_p$
85	7 снизу	$10^{14} \cdot \frac{\pi \cdot 0,52 \cdot 10^{-2}}{4} \cdot 10^{-}$	$10^{14} \cdot \frac{\pi \cdot 0,52 \cdot 10^{-2}}{4} \cdot 10^{-2}$
111	2 сверху	производимости	проводимости
111	8 и 10 сверху	активизации	активации
120	5 сверху	прочности химического	прочности от химического
135	литерат. 6	стр. . .	стр. 113
147	11 снизу	$\varepsilon \cong 1000$	$\varepsilon \approx 1000$
148	подпись к рис. 4.	<i>Иразр. Ипроб.</i>	<i>Иразр. / Ипроб.</i>
204	рис. 1	KbBr	RbBr
253	подпись к рис. 6	$2 - f = 4 \cdot 10^3 \text{ гц}; 3 - f = 10^2 \text{ гц}$	$2 - f = 4 \cdot 10^2 \text{ гц}; 3 - f = 10^3 \text{ гц}$
273	7 сверху	KCl	KCl
290	подпись к рис. 4	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
294	1 снизу	от 10	от $10^{-4}$ при $f = 2 \cdot 10^7$ до 6 10
282		таблица	таблица 2
324	3 сверху	стр. 269	стр. 251
336	16 снизу	[3,4]	[3]
337	10 сверху	[5]	[4]
337	4 снизу	[6]	[5]
337	1 снизу	[7]	—
338	2 сверху	[8]	[6]
338	4 и 5 сверху	[9,10]	[7,8]
339	8 снизу	[11,12]	[9,10]
340	14 сверху	[13]	[11]
347	23 снизу	[14]	[12]
347	3,4 снизу	[15]	—
348	17 снизу	[16]	[13]
350	4 сверху	$\psi_{\varphi} [M] x = \text{Const}$	$\psi_{\varphi} [M] x = \text{Const}$
451	1 снизу	механический	технический