

запаздыванием разряда, что больше всего нас интересует, а тепловыми, поляризационными и прочими явлениями.

Заслуживают рассмотрения работы Вальтера и Инге [3], Диттерта [4], Хиппеля и Алжера [5].

А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге [3] обнаружили независимость электрической прочности стекла от времени воздействия напряжения в пределах от 10^{-7} до 1 сек.

Аналогичные результаты для бакелизованной бумаги в пределах времени от 10^{-8} до 10^{-1} сек приводит Диттерт [4].

Хиппель и Алжер [5] получили интересную зависимость для монокристаллов КВг. При уменьшении времени воздействия напряжения электрическая прочность от длительного времени до времени 10^{-4} сек остается постоянной, затем уменьшается и при времени $5 \cdot 10^{-5}$ сек достигает минимума, затем растет. При времени 1 мк сек электрическая прочность достигает первоначального значения, а при времени $1,7 \cdot 10^{-8}$ сек превышает первоначальное значение на 33%.

Японские исследователи Кавамура, Окура и Кикиши [6] пытались экспериментально проверить теорию Зейтца о статистическом времени запаздывания. Они не обнаружили запаздывания разряда для стекла и КСl (время запаздывания разряда, по их данным, не более $3 \cdot 10^{-8}$ сек), но для слюды время запаздывания получилось при 10% перенапряжения порядка 10^{-4} сек. Это время слишком велико и, видимо, обусловлено дефектами в методике.

Таким образом, нет надежных данных о времени запаздывания разряда, о скоростях развития разряда для различных твердых диэлектриков. Требуются систематические исследования. Нами были исследованы зависимости электрической прочности монокристаллов NaCl, KCl, KBr и KJ, а также органического стекла от времени воздействия напряжения в однородном поле.

Методика эксперимента

Для опытов бралась естественная каменная соль. Монокристаллы КСl, КВг и КJ были выращены из расплава. В образцах исследуемых диэлектриков высверливалась сферическая выточка. Поверхности образца полировались, после чего покрывались слоем олова путем распыления последнего в вакууме.

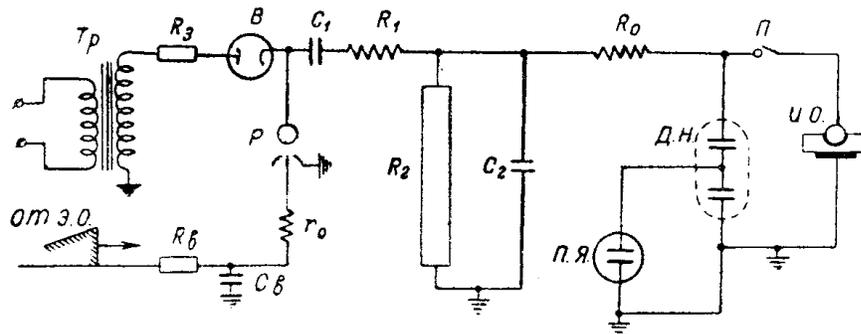


Рис. 1. Схема установки для испытания на пробой диэлектриков при временах воздействия напряжения от 10^{-7} сек до 10^{-4} сек. Тр — трансформатор, R_3 — защитное сопротивление; В — выпрямитель, Р — тригatron, R_6 и C_6 — сопротивление и емкость временной задержки, C_1 , R_1 , C_2 , R_2 — параметры генераторной цепи, r_0 и R_0 — токоограничивающие сопротивления; Д. Н. — делитель напряжения; И. О. — испытуемый объект. П. Я. — пластины явления осциллографа; П — переключатель для подключения И. О.

Толщина образцов монокристаллов NaCl, KCl, KBr и KI в самом тонком месте, где происходит пробой, составляла обычно 150 ± 10 мкн. При времени воздействия напряжения $2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек толщина образцов NaCl была 100 ± 10 мкн, а образцов KCl — 120 ± 10 мкн. Толщина образцов органического стекла была 50 ± 10 мкн.

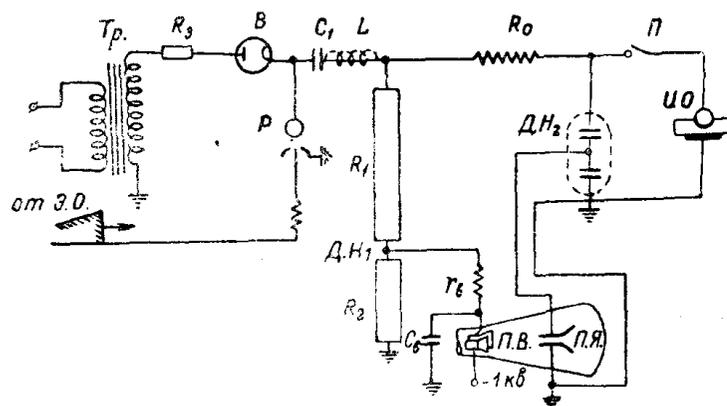


Рис. 2. Схема установки для испытания на пробой диэлектриков при времени воздействия напряжения порядка 10^{-8} сек. Tr — трансформатор; R_3 — защитное сопротивление; B — выпрямитель; P — триггер; R_0 — токоограничивающее сопротивление; П — переключатель для подключения И. О.; И. О. — испытуемый объект; П. Я. — пластины явления осциллографа; C_1 — генерирующая емкость; L — паразитная индуктивность генераторной цепи; R_1 и R_2 — сопротивления (разрядные) делителя напряжения (D. Н₁) для временной цепи; Γ_6 и C_6 — сопротивление и емкость временной цепи; D. Н₂ — делитель напряжения для П. Я.; П. В. — пластины времени.

В опытах с импульсным напряжением в качестве измерительного и регистрирующего прибора применялся электронный осциллограф.

Для времен воздействия напряжения $10^{-7} \div 10^{-4}$ сек применялась обычная схема импульсного генератора (рис. 1), дающая импульс напряжения, математическое выражение которого $U = A(e^{p_1 t} - e^{p_2 t})$. В качестве коммути-

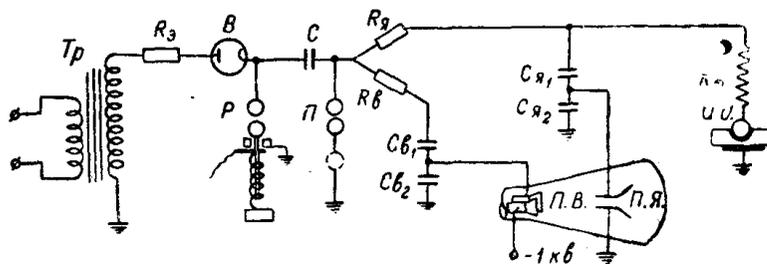


Рис. 3. Схема установки для испытания на пробой диэлектриков при времени воздействия напряжения порядка 10^{-1} сек. Tr — трансформатор; R_3 — защитное сопротивление B — выпрямитель; C — генерирующая емкость; R — токоограничивающее сопротивление, И. О. — испытуемый объект; П. Я. — пластины явления осциллографа, П. В. пластины времени; $R_в$, $C_в1$, $C_в2$ — параметры временной цепи; $R_я$, $C_я1$, $C_я2$ — параметры цепи явления; P — механический выключатель; П — переключатель.

рующего элемента применен триггер. Для синхронизации работы импульсного генератора и электронного осциллографа служили временная задержка ($R_в$, $C_в$) и искровое реле.

Для времен воздействия напряжения $2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек применялся генератор, состоящий из емкости и сопротивления (рис. 2). Длина фронта импульса в этом случае определялась паразитной индуктивностью конден-

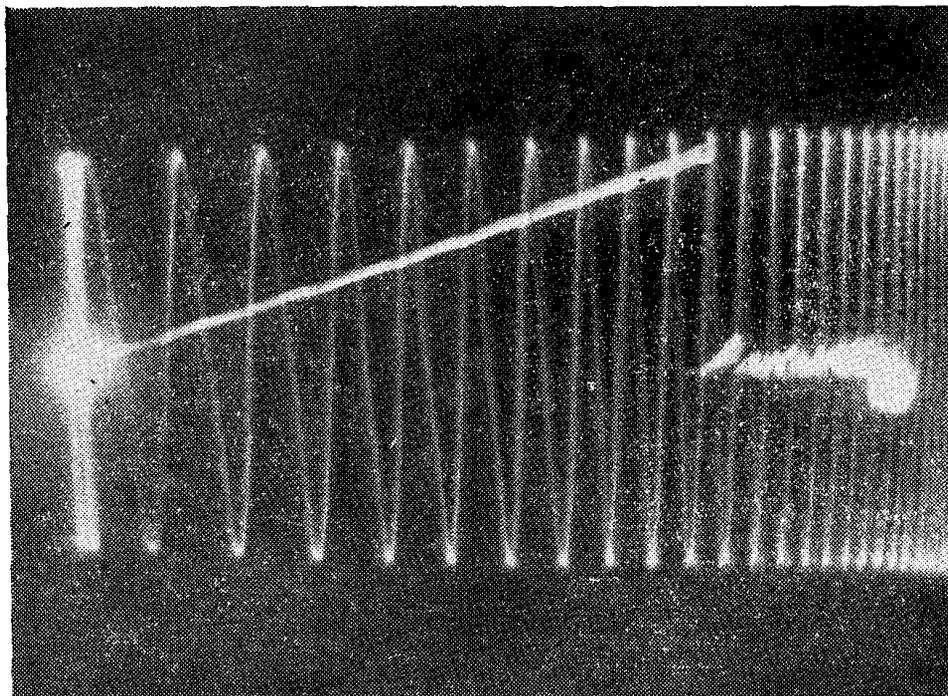


Рис. 4-а. Градуировочные колебания с частотой 50 гц,

сатора и генерирующей цепи и паразитной емкостью. Значительную трудность при коротких временах представляет синхронизация срабатывания импульсного генератора и временной развертки осциллографа. Чтобы им-

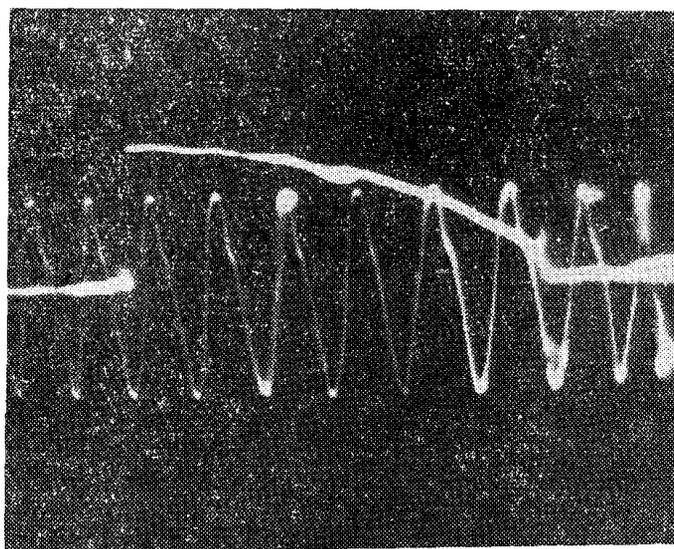


Рис. 4-б. Градуировочные колебания с частотой $f = 100$ кгц,

пульс всегда попадал на экран осциллографа, был применен запуск развертки от исследуемого явления.

Для времени воздействия напряжения порядка 10^{-1} сек в качестве коммутирующего элемента был применен механический включатель, сконструированный А. Ф. Калгановым. Переход от дуги на механическое включение был сделан потому, что трудно рассчитывать на устойчивость дуги

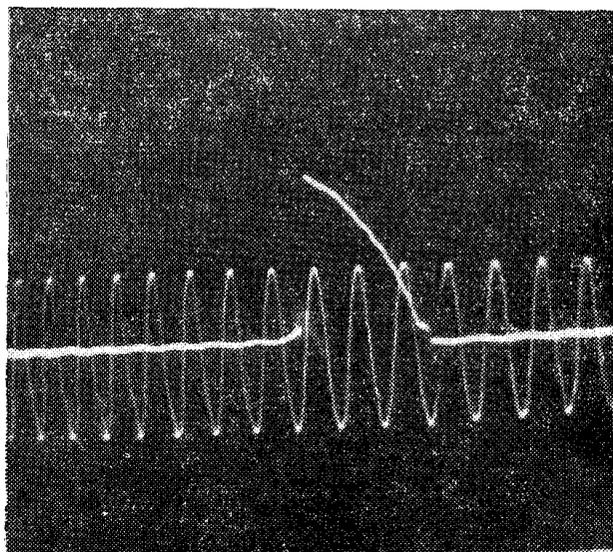


Рис. 4-в. Градуировочные колебания с частотой 1 мгц.

в течение длительного времени при слабой ее мощности, которая имеет место в данном случае. При включении механического включателя генерирующая емкость заряжает через высокоомные сопротивления две другие емкости. Напряжение на одной емкости используется для пробоя образца, напряжение на другой емкости—для временной развертки (рис. 3).

При пробое на постоянном напряжении в качестве измерительного прибора использовался высоковольтный электростатический вольтметр типа С 96.

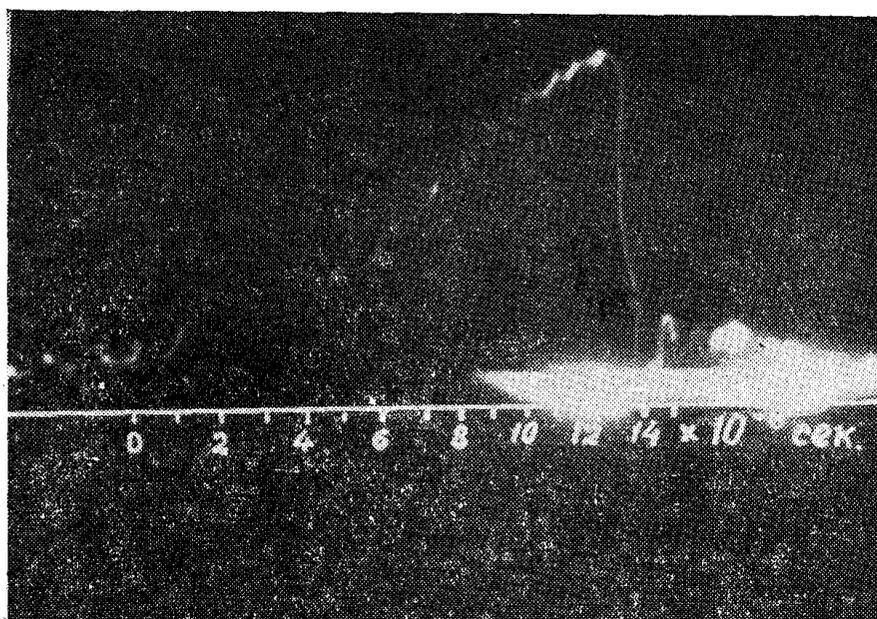


Рис. 4-г. Время воздействия напряжения порядка 10^{-7} сек.

На рис. 4 представлены осциллограммы пробоя при различных временах воздействия напряжения.

Результаты опытов

При испытании на пробой монокристаллов NaCl, KCl, KBr и KJ на каждое время воздействия напряжения было взято, как правило, 20 — 30 образцов. Производилась статистическая обработка опытных точек по вероятности пробоя. Учитывая, что наибольшая прочность бывает у наиболее чистых и недефектных образцов, нами брались в качестве основных значения электрической прочности с вероятностью пробоя $\psi = 90\%$. На рис. 5

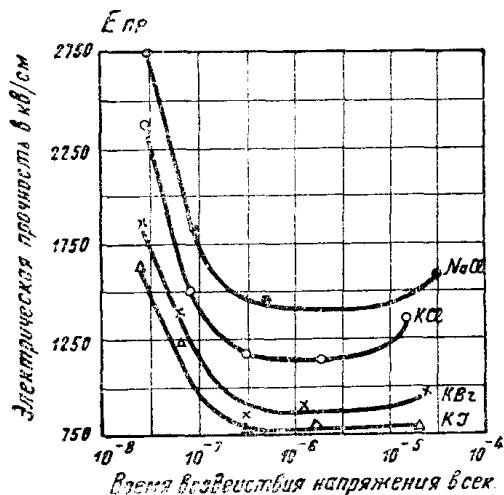


Рис. 5. Зависимость электрической прочности монокристаллов NaCl, KCl, KBr и KJ от времени воздействия напряжения.

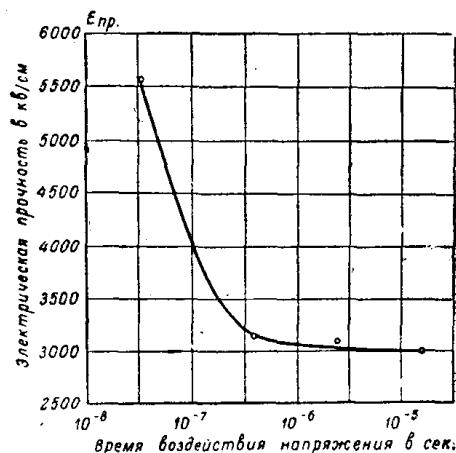


Рис. 6. Зависимость электрической прочности органического стекла от времени воздействия напряжения.

представлены полученные нами экспериментально зависимости электрической прочности монокристаллов NaCl, KCl, KBr и KJ от времени воздействия напряжения при вероятности пробоя $\psi = 90\%$. На рис. 6 представлена аналогичная зависимость для органического стекла, для которого брались от 9 до 13 образцов на каждую точку. Получены данные при пробое рентгенизованной каменной соли при освещении и в темноте при времени воздействия напряжения $2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек. При вероятности пробоя $\psi = 90\%$ имеем следующие данные:

Нерентгенизованная каменная соль	$E_{пр} = 2740$ кВ/см.
Рентгенизованная каменная соль пробитая в темноте	$E_{пр} = 2690$ кВ/см.
Рентгенизованная каменная соль пробитая при освещении	$E_{пр} = 2800$ кВ/см.

Разница в приведенных значениях электрической прочности мала, и можно считать, что электрическая прочность нерентгенизованной каменной соли и рентгенизованной, пробитой в темноте и при освещении, практически одна и та же.

Для всех исследованных нами твердых диэлектриков получилось увеличение электрической прочности при малых временах воздействия напряжения. Для монокристаллов NaCl, KCl, KBr и KJ получилось некоторое увеличение электрической прочности при времени воздействия напряжения

порядка 10^{-5} сек. Образцы каменной соли пробивались также на постоянном напряжении и импульсном при времени воздействия напряжения порядка 10^{-4} и 10^{-1} сек. Электрическая прочность, полученная в этих опытах, практически совпадает с электрической прочностью при времени воздействия напряжения порядка 10^{-5} сек.

Обсуждение результатов

Более высокая электрическая прочность ионных кристаллов на постоянном напряжении по сравнению с импульсным получалась многими исследователями. Причем этот эффект приписывают влиянию образования объемного заряда.

Б. М. Гохберг и А. В. Иоффе [7] считают, что объемный заряд создает в диэлектрике поле, обратное приложенному, и для пробоя диэлектрика требуется более высокое приложенное напряжение.

Видимо, в наших опытах при времени воздействия напряжения порядка 10^{-5} сек успевал образоваться объемный заряд, что привело к повышению электрической прочности.

Повышение электрической прочности исследованных диэлектриков при времени воздействии напряжения $1 \cdot 10^{-7}$ сек и меньшем вызвано запаздыванием разряда. Запаздывание разряда может быть связано с двумя обстоятельствами: в течение малого времени, когда воздействует напряжение, может не быть свободных эффективных электронов; или время формирования разряда соизмеримо с временем воздействия напряжения. Первое обстоятельство для твердых диэлектриков с высокой электрической прочностью, по нашему мнению, отпадает.

В твердых диэлектриках при напряженностях электрического поля, близких к пробивной, имеет место значительная электростатическая ионизация, которая является поставщиком электронов. В пользу довода, что свободные электроны есть в твердом диэлектрике при больших напряженностях поля, говорит факт об электрической равнопрочности нерентгенизованной и рентгенизованной каменной соли, указанный выше.

Если в рентгенизованной каменной соли в объеме высоких напряженностей поля за время запаздывания разряда образуется при сильном освещении хотя бы один электрон, это будет доказывать, что и в нерентгенизованной каменной соли при больших напряженностях поля появляются свободные электроны.

Произведем грубый расчет. Возьмем площадку электрода диаметром 0,5 мм. Напряженности электрического поля под этой площадкой могут различаться максимум на 6% (при толщине образца 0,1 мм и радиусе выточки 10 мм), что лежит в пределах точности измерений. При освещении рентгенизованной каменной соли, как указывают Вальтер и Инге [8], образуется 10^{14} свободных электронов в 1 см^3 за 1 сек. В объеме рентгенизованной каменной соли между электродами при диаметре их 0,5 мм и толщине 0,1 мм за время 10^{-8} сек¹⁾ образуется $10^{14} \cdot \frac{\pi \cdot 0,5^2 10^{-2}}{4} 10^{-8}$.

$\cdot 10^{-8} = 19$ свободных электронов. Следовательно, запаздывание разряда в исследованных твердых диэлектриках обязано не отсутствию свободных электронов, а длительности процесса формирования разряда. Следовательно, время запаздывания разряда в исследованных диэлектриках есть время формирования разряда при данных условиях воздействия напряжения.

1) Ниже будет показано, что время формирования разряда в исследованных диэлектриках (1—3) 10^{-8} сек.

Теория Зейтца о статистическом времени запаздывания, по нашему мнению, не применима к „толстым“ слоям толщиной в 100 $\mu\text{кн}$ и более. При такой толщине начавшаяся электронная лавина, пройдя толщу диэлектрика, при любых условиях, если не затухнет, достигнет величины, достаточной для разрушения диэлектрика. Однако мысль Зейтца о роли отдельных электронов является интересной и заслуживающей внимания. Развитие разряда может происходить в более или менее благоприятных условиях. Благоприятные условия для пробоя создаются в диэлектрике с какой-то статистической вероятностью. При больших временах воздействия напряжения пробой происходит в подавляющем числе случаев в благоприятных условиях, и разброс в значениях электрической прочности твердых диэлектриков обусловлен частными отличиями в структуре (микротрещины, дефекты обработки образца, примеси и др.) различных образцов. При малых временах воздействия к этой причине разброса добавляется разброс из-за различия во времени формирования разряда у различных образцов. Поэтому в общем случае разброс в значениях электрической прочности при малых временах воздействия напряжения больше, чем при больших временах. Это известно для воздуха и подтверждается для исследованных нами твердых диэлектриков, как это показывают данные табл. 1.

Таблица 1

Время воздействия напряжения	Разброс от среднего значения							
	NaCl		KCl		KBr		KJ	
	<i>кв/см</i>	%	<i>кв/см</i>	%	<i>кв/см</i>	%	<i>кв/см</i>	%
10^{-6} сек	340	29,3	335	37,8	275	35,1	235	35,4
$2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек	790	37,4	710	40,6	520	35,1	575	47,3

Следовательно, время формирования разряда в исследованных диэлектриках носит статистический характер, что уже давно установлено для воздуха.

В табл. 2 приведены рассчитанные значения времени формирования разряда и средней скорости развития разряда для исследованных диэлектриков. Расчеты относятся к значениям электрической прочности при вероятности пробоя $\psi = 90\%$. Время формирования разряда определялось по графику, как показано на рис. 7. Кривые изменения напряжения при расчете брались из осциллограммы. Приняв, что при формировании разряд проходит через всю толщу диэлектрика, можно подсчитать среднюю скорость развития разряда $V_{cp} = \frac{d}{t_{\phi}}$.

Данные табл. 2 показывают, что с увеличением перенапряжения время формирования разряда уменьшается, а средняя скорость развития разряда увеличивается, как это и следовало ожидать.

При времени воздействия напряжения $2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек время формирования разряда уменьшается, а средняя скорость развития разряда увеличивается при переходе от NaCl к KJ, т. е. с уменьшением энергии решетки и с увеличением постоянной решетки (рис. 8). При времени воздействия напряжения $6 \div 9 \cdot 10^{-8}$ сек не получилось определенной картины.

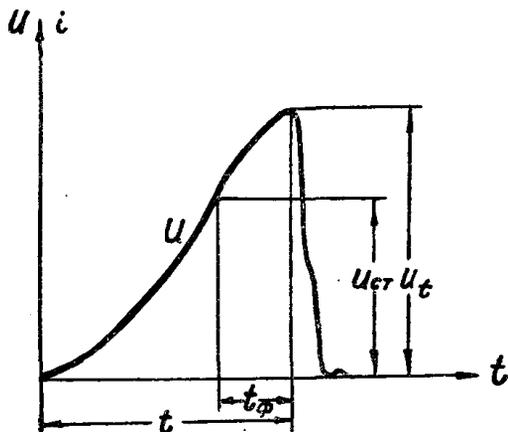
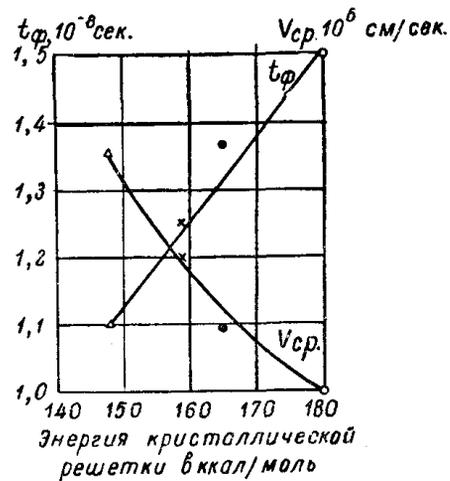
Скорости развития разряда в исследованных диэлектриках порядка 10^6 см/сек, а скорость электронных лавин в воздухе около 10^7 см/сек, хотя напряженность поля в последнем случае в несколько десятков раз

Таблица 2

Исследованные диэлектрики	Время воздействия напряжения $6 \div 9 \cdot 10^{-8}$ сек				Время воздействия напряжения $2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек			
	Количество образцов	Перенапряжение в %	t_{ϕ} 10^{-8} сек	$V_{\text{ср.}}$ 10^6 см/сек	Количество образцов	Перенапряжение в %	t_{ϕ} 10^{-8} сек	$V_{\text{ср.}}$ 10^6 см/сек
NaCl	30	14	1,7	0,88	11	46,1	1,5	1,0
KCl	33	16,1	1,6	0,94	11	54	1,37	1,095
KBr	15	29,5	2,2	0,68	6	55,8	1,2	1,25
KJ	12	28,4	2,1	0,72	14	53,8	1,1	1,36
Органическое стекло	Нет данных				11	41,4	1,1	0,526

Примечания: 1. Время t_{ϕ} приведено к толщине $d = 150$ мкм по формуле $t_{\phi} = t_{\phi \text{ действ.}} \frac{150}{d}$. (2)

2. Так как при формировании разряда в данном случае напряжение не оставалось постоянным, а было возрастающим, было принято среднее перенапряжение, указанное в таблице 2 и подсчитанное по формуле $\eta = \frac{U_t - U_{\text{стат}}}{2 U_{\text{стат}}} 100\%$.

Рис. 7. График к определению времени формирования разряда (t_{ϕ}).Рис. 8. Зависимость времени формирования разряда (t_{ϕ}) и средней скорости развития разряда ($V_{\text{ср}}$) от энергии решетки кристаллов NaCl (O O), KCl (● ●) KBr (X X) и KJ (Δ Δ).

меньше. Видимо, движение электрона в твердом диэлектрике сильно тормозится частыми столкновениями с ионами (или атомами) и их сильным электростатическим влиянием. На основании данных о скорости развития можно заявить, что время разряда в твердом диэлектрике примерно на порядок больше, чем в воздухе при одном и том же расстоянии между электродами.

Как показывают осциллограммы при малых временах воздействия напряжения, спад напряжения на образце при пробое имеет некоторую длительность. Эта длительность для исследованных диэлектриков лежит в пределах от $2 \cdot 10^{-9}$ до $1,5 \cdot 10^{-8}$ сек и в среднем составляет $7 \cdot 10^{-9}$ сек. Таким образом, процесс пробоя твердого диэлектрика можно разбить на 2 стадии: стадию формирования разряда, в конце которой создается высокая электропроводность, и стадию завершения пробоя, когда сопротивление канала пробоя падает практически до нуля, и напряжение на образце снижается до нуля.

А. А. Воробьев [9] заметил пропорциональность между электрической прочностью и энергией решетки щелочно-галогидных солей. Кривые рис. 5 показывают, что указанная зависимость имеет место и в данном случае во всем исследованном интервале времени от 10^{-5} до $(2 \div 3) 10^{-8}$ сек.

Выводы

1. Для монокристаллов NaCl, KCl, KBr и KI замечено некоторое увеличение электрической прочности при времени воздействия напряжения порядка 10^{-5} сек, что связано, видимо, с образованием объемного заряда в образце.

2. Для всех исследованных диэлектриков при времени воздействия напряжения $1 \cdot 10^{-7}$ сек и меньшем получено увеличение электрической прочности, связанное с запаздыванием разряда.

3. Определенное расчетом время запаздывания разряда получилось порядка 10^{-8} сек. Время формирования разряда

а) уменьшается с увеличением перенапряжения;

б) при времени воздействия напряжения $(2 \div 3) 10^{-8}$ сек снижается с уменьшением энергии решетки и с увеличением постоянной решетки;

в) носит статистический характер.

4. Средняя скорость развития разряда в исследованных диэлектриках порядка 10^6 см/сек.

5. Время спада напряжения на образце при пробое для исследованных диэлектриков в среднем составляет $7 \cdot 10^{-9}$ сек.

6. Пробой исследованных твердых диэлектриков можно разбить на 2 стадии: стадию формирования разряда и стадию завершения пробоя.

7. Электрическая прочность монокристаллов NaCl, KCl, KBr и KI во всем исследованном интервале времен пропорциональна энергии решетки.

Настоящая работа была проведена под научным руководством А. А. Воробьева, которому автор выражает свою искреннюю благодарность.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Whitehead, The Dielectric Breakdown of Solids, Oxford, Clarendon Press, London, 1951.

2. F. Seitz, Phys. Rev., 76, 1376, 1949.

3. А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге, ЖПФ, 6, 3, 1929.

4. Dittert, Dissertation, Dresden, 1930.

5. A. von Hippel and R. S. Alger, Phys. Rev., 76, № 1, 127—133, 1949.

6. Н. Kawamura, Н. Ohkura and Т. Kikuchi, Journ. Phys. Soc. Japan, 9, № 4, 541—545, 1954.

7. Б. М. Гохберг и А. В. Иоффе, ЖЭТФ, 1, 1264, 1931.

8. А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге, ДАН СССР, 2, № 2, 65—71, 1934.

9. А. А. Воробьев, ЖТФ, 10, 183, 1940.

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