

ИМПУЛЬСНЫЙ ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

А. А. ВОРОБЬЕВ, Г. А. ВОРОБЬЕВ

Введение

При конструировании изоляции требуется знать электрическую прочность изоляционных материалов. Кроме того, при физических исследованиях диэлектриков важно бывает знать зависимость их электрической прочности от каких-либо факторов. При этом, особенно во втором случае, импульсные испытания диэлектриков на пробой имеют преимущества перед испытаниями на пробой на постоянном и переменном напряжениях.

При воздействии на твердый диэлектрик импульсного напряжения достаточно малой длительности можно избежать влияния объемных зарядов и тепловыделений на величину электрической прочности и получить истинное ее значение.

Хиппель и Алжер [1] определяли температурную зависимость электрической прочности монокристаллов бромистого калия при различной длительности воздействия напряжения. Полученная ими температурная зависимость на постоянном напряжении и импульсах длительностью не менее 10^{-3} сек имеет максимум, что авторы объясняют влиянием объемных зарядов. При наименьшей экспозиции, порядка 10^{-6} сек, получилось монотонное увеличение электрической прочности с повышением температуры. Авторы считают, что в этом случае не успели образоваться объемные заряды, и была получена истинная температурная зависимость.

А. М. Трубицын [2], учитывая возможность образования объемных зарядов, влияние тепловыделений, а также влияние запаздывания разряда, пришел к выводу, что для получения истинного значения электрической прочности твердых диэлектриков с толщиной порядка десятых долей мм пробой их надо производить на фронте импульса с длительностью до пробоя порядка 10^{-6} сек. А. М. Трубицын подчеркнул, что во избежание влияния накопительных эффектов (тепловыделений, объемных зарядов, неполных пробоев) пробой следует производить на фронте одиночного импульса.

В отдельных случаях требуется определить электрическую прочность диэлектриков и полупроводников, обладающих значительной электропроводностью. В этом случае испытания можно провести только на импульсном напряжении.

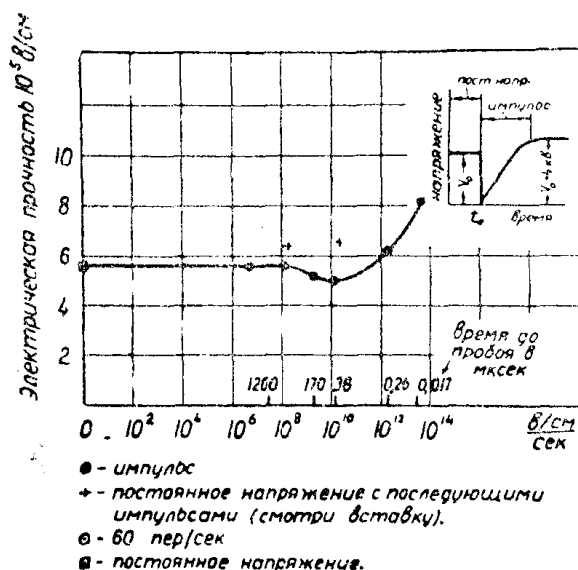
Только на импульсном напряжении можно получить такие важные для теории пробоя и практики грозозащиты характеристики, как время запаздывания разряда, скорость распространения разряда.

1. Зависимость электрической прочности твердых электриков от времени воздействия Кристаллы щелочно-галогидных солей

Хиппель и Алжер [1] исследовали зависимость электрической прочности монокристаллов бромистого калия от экспозиции. На фиг. 1 представлена полученная зависимость, которую авторы объясняют влиянием на величину электрической прочности объемных зарядов: электронного и ионного. Каждый объемный заряд в отдельности, по мнению авторов,

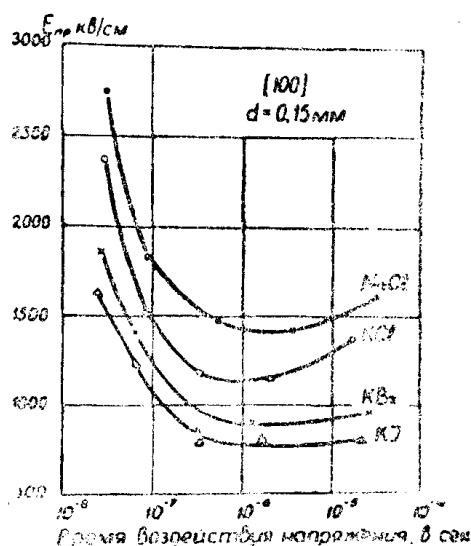
создает неравномерность поля в диэлектрике и снижает его электрическую прочность. Одновременное присутствие в диэлектрике обоих видов зарядов приводит к компенсации их влияния, и при этих условиях получается истинное значение электрической прочности при экспозиции более 10^{-4} сек (фиг. 1). Возрастание электрической прочности при малых временах объясняется запаздыванием в образовании электронного объемного заряда.

Г. А. Воробьев [3] получил временные зависимости электрической прочности монокристаллов каменной соли, хлористого, бромистого и иодистого ка-



Фиг. 1. Зависимость электрической прочности кристаллов КВг от скорости приложения напряжения (по Хиппелю и Алжеру).

лия, представленные на фиг. 2. Толщина образцов составляла 0,15 мм. Во всем диапазоне экспозиций наблюдается пропорциональность электрической прочности энергии кристаллической решетки, что ранее было установлено А. А. Воробьевым [4]. Некоторое повышение электрической прочности указанных монокристаллов при экспозиции 10^{-5} сек и больше объясняется автором влиянием объемного заряда, повышение электрической прочности при экспозиции $1 \cdot 10^{-7}$ сек и меньше — запаздыванием разряда. Автор считает, что при экспозиции $4 \cdot 10^{-7} \div 6 \cdot 10^{-6}$ сек, когда уже не сказывается запаздывание разряда и еще нет объемного заряда, для образцов монокристаллов щелочно-галогидных солей толщиной порядка десятых долей мм получается истинное значение электрической прочности. Это находится в согласии с предположением А. М. Трубицына [2].



Фиг. 2. Зависимость электрической прочности монокристаллов каменной соли, хлористого, бромистого и иодистого калия от времени воздействия напряжения (по Г. А. Воробьеву). Вероятность пробоя = 90%.

Инуиши и Суита [5] производили пробой монокристаллов хлористого калия и серы в слабонеоднородном¹⁾ и сильнонеоднородном полях, на импульсах, близких к прямоугольным. Время, прошедшее с момента, когда напряжение достигло максимума, до момента снижения напряжения в результате пробоя, авторы принимали за время запаздывания разряда. Это время уменьшалось с увеличением амплитуды импульса.

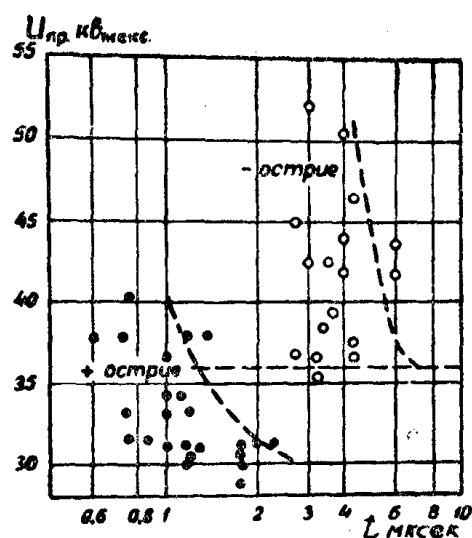
К. К. Сончик [6] получил аналогичную зависимость для монокристаллов каменной соли, хлористого, бромистого и иодистого калия при пробое в однородном и неоднородном полях на импульсах, близких к прямоугольным.

Кавамура, Окура, Кикуши [7] производили пробой некоторых твердых диэлектриков сериями прямоугольных импульсов длительностью каждый $3 \cdot 10^{-3}$ сек. Образцы монокристаллов хлористого калия толщиной 10^{-3} см пробивались на первом же импульсе, поэтому авторы считают, что время запаздывания в указанных образцах не более $3 \cdot 10^{-8}$ сек.

Плесснер [8] исследовал зависимость электрической прочности поликристаллических пленок бромистого калия, фтористого натра, фтористого кальция, кварца и полистирола от толщины и длительности воздействия напряжения. Для пленок бромистого калия, фтористого натра и кальция толщиной $10^{-4} \div 10^{-5}$ см получено монотонное возрастание электрической прочности с уменьшением экспозиции от 10 до 10^{-5} сек. Это возрастание, по мнению автора, не обусловлено запаздыванием разряда. Ссылаясь на работы Фрелиха, автор принял, что движение электронов совершается за время не более 10^{-8} сек. Плесснер предполагает, что полученная им зависимость обусловлена тепловыми эффектами и поляризационными поверхностными явлениями.

А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге [9] получили вольтсекундные характеристики пластинок каменной соли толщиной 2,7 мм при пробое в электрическом поле острие — плоскость. Полученные ими зависимости представлены на фиг. 3. Повышение пробивного напряжения при уменьшении экспозиции, по мнению авторов, обусловлено запаздыванием разряда.

Г. А. Воробьев [3] получил вольтсекундные характеристики некоторых твердых диэлектриков, пробитых в неоднородном поле при толщине диэлектрика 0,7 мм. В этих опытах было обращено внимание на устранение влияния краевых разрядов. Если пластинку диэлектрика зажать между электродами острие — плоскость и подать на них напряжение, то при некоторой величине напряжения около острия появляются разряды по поверхности пластинки диэлектрика. Эти разряды могут снизить пробивное напряжение. Влияние поверхностных разрядов на пробивное напряжение показано в работе А. А. Воробьева и

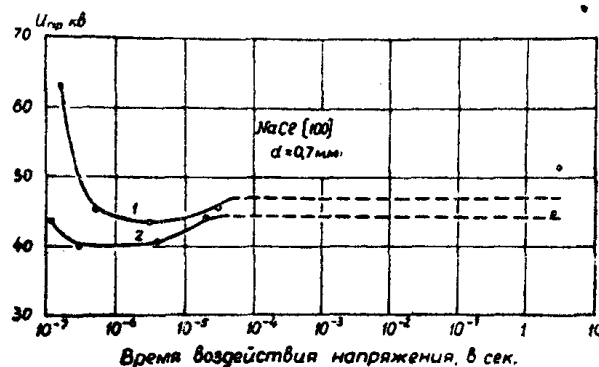


Фиг. 3. Вольтсекундные характеристики каменной соли при пробое в неоднородном поле. Толщина 2,7 мм (по А. Ф. Вальтеру и Л. Д. Инге).

¹⁾ Electrodes were — hemisphere against plane, but radius of rounding of hemisphere is close to thickness of specimen. In such case even in the thinnest place the field will not be uniform, it will be weakly non-uniform.

Н. А. Приходько [10], где для одного и того же твердого диэлектрика получается различный эффект полярности и различные температурные зависимости пробивного напряжения при помещении образца при пробое в различные жидкие среды. Образцы брались в виде пластинок, на которые накладывались электроды острие и плоскость.

Г. А. Воробьев делал в образцах конусные выточки, что устраняло влияние поверхностных разрядов. Полученные им зависимости представлены на фиг. 4 и 5. Некоторое повышение пробивного напряжения каменной соли при экспозиции 10^{-5} сек и больше автор объясняет так же, как



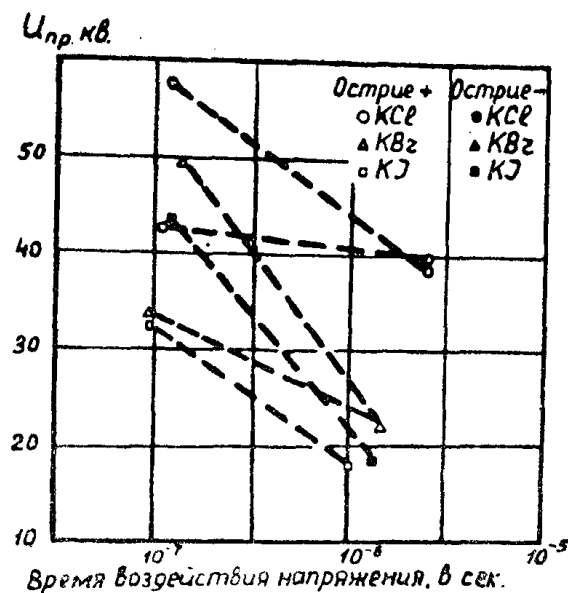
Фиг. 4. Вольтсекундные характеристики каменной соли при пробое в неоднородном поле (по Г. А. Воробьеву).
1—острие (—); 2—острие (+).

и в случае однородного поля, влиянием объемного заряда, повышение пробивного напряжения монокристаллов каменной соли, хлористого, бромистого и иодистого калия при экспозиции $1 \div 2 \cdot 10^{-7}$ сек — запаздыванием разряда.

Можно сказать, что в кристаллах щелочно-галогенидных солей при толщине образца порядка десятых долей мм и больше в случае пробоя как в однородном, так и в неоднородном полях обнаружено увеличение пробивного напряжения с уменьшением экспозиции. Большинство исследователей считает, что это обусловлено запаздыванием разряда.

Кристаллы, содержащие молекулы воды

Кавамура, Окура, Кикиши [7] при пробое образцов слюды толщиной 10^{-4} см серией импульсов обнаружили, что число поданных импульсов до пробоя тем меньше, чем больше амплитуда импульса. Произведение числа поданных импульсов «n» на длительность импульса «T», т. е. величину nT, авторы принимали за время запаздывания разряда. Эта величина при 10-процентном перенапряжении составляет 10^{-4} сек.



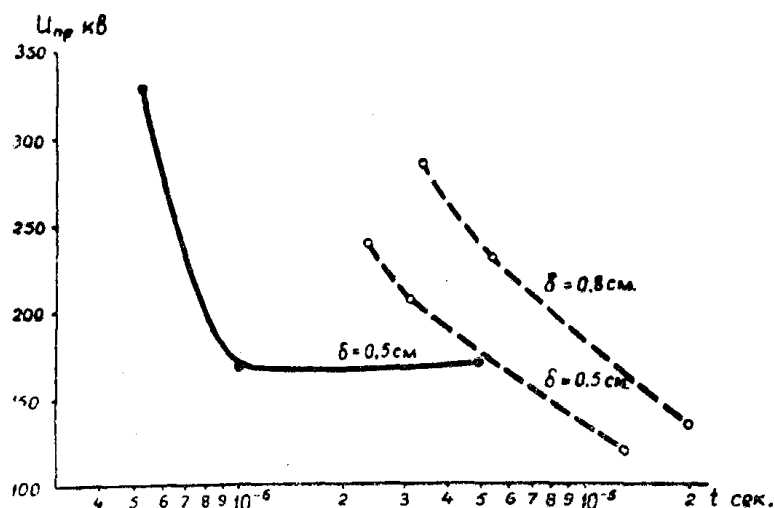
Фиг. 5. Вольтвременные характеристики при пробое монокристаллов хлористого, бромистого и иодистого калия в неоднородном поле (по Г. А. Воробьеву).

Е. А. Конорова [11] производила пробой образцов слюды толщиной $5 \cdot 10^{-4}$ см на фронте одиночного импульса. Она не обнаружила изменения электрической прочности слюды при изменении экспозиции от 10^{-6} до $5 \cdot 10^{-8}$ сек. Е. А. Конорова объясняет разницу в своих результатах и результатах японских исследователей [7] возможным различным влиянием объемного заряда в обоих случаях. При малых толщинах ($10^{-5} \div 10^{-4}$ см) влияние объемного заряда может быть большим.

М. А. Мельников [26], исследуя вольтсекундные характеристики слюды толщиной 25 микрон, обнаружил запаздывание разряда только при экспозиции $5 \cdot 10^{-9}$ сек.

К. М. Кевролева [12] исследовала вольтсекундные характеристики некоторых кристаллов, содержащих кристаллизационную воду. Повышение электрической прочности при экспозиции 10^{-7} сек и меньше автор объясняет запаздыванием разряда.

А. В. Астафуров [13] исследовал вольтсекундные характеристики льда речного при расстоянии между электродами 0,5–2,0 см. Соответствующие данные представлены на фиг. 6. Увеличение пробивного напря-



Фиг. 6. Вольтсекундные характеристики льда (...) и дистиллированной воды (000) при пробое в однородном поле (по А. В. Астафурову).

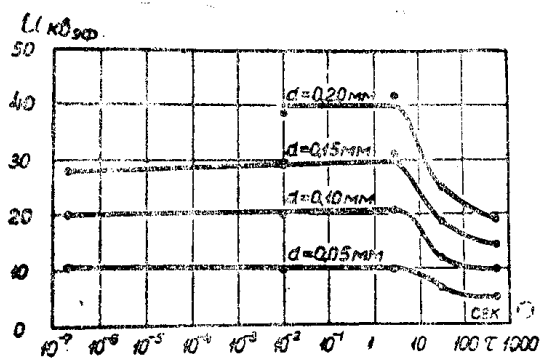
жения при экспозиции меньше 10^{-5} сек автор объясняет запаздыванием разряда.

Таким образом, в монокристаллах, содержащих кристаллизационную воду, толщиной порядка десятых долей мм и около 1 см при малых экспозициях, обнаружено увеличение электрической прочности, что объясняется запаздыванием разряда.

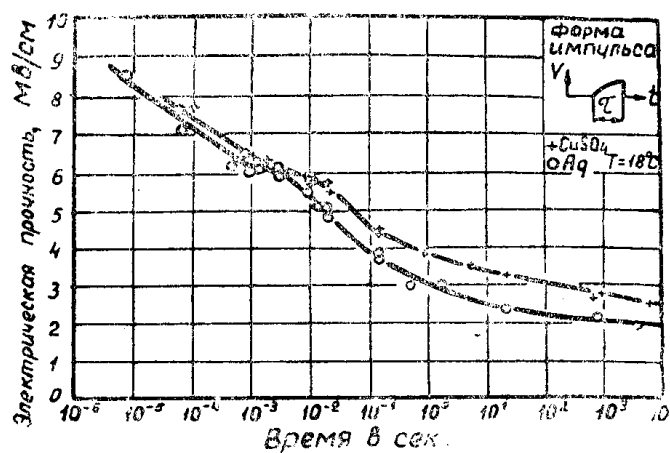
Аморфные диэлектрики

А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге [14] исследовали вольтсекундные характеристики стекла в однородном поле. Соответствующие данные приведены на фиг. 7. Повышения электрической прочности при малых экспозициях не обнаружено.

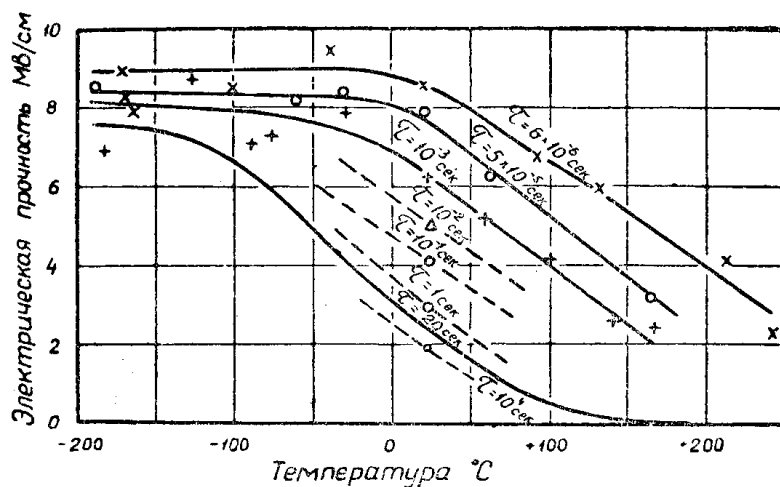
Келлер [15] исследовал зависимости электрической прочности тюрингского стекла от экспозиции и от температуры. Соответствующие данные приведены на фиг. 8 и 9. Увеличение электрической прочности



Фиг. 7. Зависимость пробивного напряжения от выдержки для стекла разных толщин в однородном поле (по А. Ф. Вальтеру и Л. Д. Инге).



Фиг. 8. Зависимость электрической прочности тюрингского стекла от времени воздействия напряжения (по Келлеру).



Фиг. 9. Зависимость электрической прочности тюрингского стекла от температуры (по Келлеру).

стекла с уменьшением экспозиции напряжения в основном следует объяснить влиянием тепловых эффектов, как и указывает сам автор.

Аналогичная зависимость от экспозиции напряжения получена Фермером [16] для пайрексного стекла, которая также объясняется влиянием тепловых эффектов.

М. А. Мельников [26] исследовал вольтсекундные характеристики органического стекла, полистирола, тефлона при толщине образца 30—40 микрон. Запаздывание разряда обнаружено только при экспозиции $5 \cdot 10^{-9}$ сек.

Не следует искать противоречия между данными Келлера и Фермера, с одной стороны, и данными А. Ф. Вальтера и Л. Д. Инге, с другой стороны. Видимо, в опытах А. Ф. Вальтера и Л. Д. Инге стекло имело малую электропроводность и пробой на импульсном напряжении носил электрический характер.

Фарфор

До сих пор мы рассматривали однородные диэлектрики. Фарфор является сложным твердым диэлектриком: в нем кроме твердой структуры имеются поры. И твердая структура и поры могут обуславливать характер вольтвременной зависимости.

А. А. Воробьев и А. Ф. Вальтер [17] приводят следующие опытные данные по пробое фарфора: при длине волны 3500 мксек коэффициент импульса составил 1,02, при длине волны 4 мксек — 1,33.

А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге [9] нашли, что электрическая прочность фарфора (толщина 0,8 мм) не зависит от экспозиции напряжения. Они получили следующие значения пробивных напряжений:

на переменном напряжении — 28 кВ			
при длительности импульса 0,9 мксек — 27 кВ			
"	"	0,95	— 28,5 кВ
"	"	0,8	— 29,4 кВ

Различие в данных указанных работ [17,9], возможно, следует объяснить различной пористостью фарфора.

Волокнистые материалы

Волокнистые материалы (бакелизованная бумага, пресшпан, картон и др.) также являются сложными твердыми диэлектриками.

Диттерт [18] исследовал вольтвременные характеристики бакелизованной бумаги толщиной 0,1 мм, 0,3 мм и 0,6 мм и эбонита толщиной 0,5 мм и 1,0 мм. Он получил, что пробивное напряжение указанных диэлектриков не зависит от экспозиции напряжения в пределах от $10^{-1} \div 1$ сек до 10^{-8} сек.

Иост [18], Штригель [19] исследовали вольтвременные характеристики большого количества твердых диэлектриков: стекла, фарфора, слюды, пресшпана, картона, миканита, эбонита и др. Эти эксперименты имели крупные методические недостатки, из которых можно указать на 2 основных.

1. Образцы диэлектриков брались в виде пластинок, на которые накладывались электроды в случае однородного поля — плоские (у Штригеля) или закругленные (у Иоста), в случае неоднородного поля — острие и плоскость. В этом случае у краев электродов в окружающей среде появляются краевые разряды, которые влияют на пробой твердого диэлектрика. Пробивное напряжение в данном случае характеризует не твердый диэлектрик, а комбинацию твердого диэлектрика и окружающей среды.

2. При проведении экспериментов не применялся электронный осциллограф, и при измерении импульсного пробивного напряжения и особенно длительности воздействия напряжения могли быть значительные погрешности.

Поэтому данные Иоста [18] и Штригеля [19] могут быть далеки от истины и должны быть проверены с привлечением более совершенной методики эксперимента.

2. Время разряда

В настоящее время считается, что электрический пробой твердых диэлектриков — электронный процесс. При этом в общем случае время разряда может состоять из двух основных составляющих: статистического времени запаздывания и времени формирования разряда.

О наличии статистического времени в твердых диэлектриках нет установившегося мнения. Уайтхэд [20] указывает, что в твердых диэлектриках всегда имеется некоторое количество свободных электронов вследствие поглощения облучения, тепловых колебаний и несовершенств кристалла, и статистическое время запаздывания в твердых диэлектриках должно отсутствовать.

Зейтц [21] развил теорию о статистическом времени запаздывания в твердых диэлектриках. Зейтц считает, что для разрушения твердого диэлектрика требуется некоторое минимальное количество электронов в лавине. Зейтц учитывает, что электроны в диэлектрике имеют различную скорость. Электроны с большой скоростью имеют большую вероятность ускориться до энергии ионизации. Поэтому при какой-либо величине напряженности электрического поля имеется некоторая вероятность того, что в результате ионизационных процессов будет получено достаточное для разрушения диэлектрика число электронов. Время между появлениями двух разрушающих лавин названо Зейтцем статистическим временем запаздывания.

Статистическое время запаздывания уменьшается с увеличением напряженности поля и в пределе определяется вероятностью появления в диэлектрике свободных электронов.

Кроу [22] исследовал запаздывание разряда в некоторых предельно очищенных жидких углеводородах, имеющих электрическую прочность порядка 10^6 в/см. Он считает, что в этих жидкостях не имеется статистического времени запаздывания, так как при сильных предпробивных полях должна иметь место холодная эмиссия электронов из катода, которая является поставщиком электронов для формирования разряда.

Указывается [23], что для начала холодной эмиссии электронов из катода требуется напряженность 300 кв/см.

А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге [24] и Г. А. Воробьев [3] исследовали запаздывание разряда в неокрашенных кристаллах каменной соли и окрашенных, пробитых в темноте и при сильном освещении. Во всех трех случаях авторы получили одинаковые значения пробивного напряжения при запаздывании разряда как в однородном (Г. А. Воробьев), так и в неоднородном (А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге) полях. В окрашенных кристаллах при сильном освещении появляется большое количество свободных электронов.

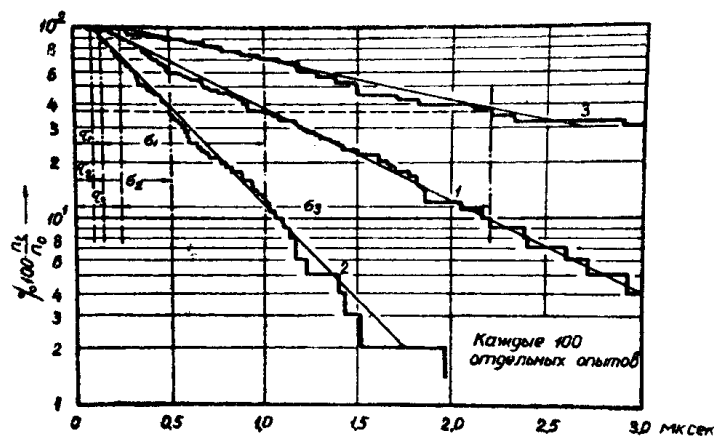
Если бы в неокрашенных кристаллах каменной соли имелось статистическое время запаздывания, то в окрашенных кристаллах оно, по меньшей мере, должно быть меньше. Однако эксперименты этого не дают. Поэтому следует сделать вывод, что в каменной соли при наименьшей экспозиции $2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек [3] статистическое время запаздывания практически отсутствует. Возможно, что при экспозициях, значительно меньших

$2-3 \cdot 10^{-8}$ сек, статистическое время запаздывания станет сравнимым с экспозицией и будет влиять на величину пробивного напряжения.

Видимо, и в других однородных твердых диэлектриках, имеющих электрическую прочность 10^6 в/см и большую при экспозиции $2-3 \cdot 10^{-8}$ сек, статистическое время запаздывания практически отсутствует. Вероятно, поставщиком электронов в указанных твердых диэлектриках являются холодная эмиссия из катода и электростатическая ионизация в диэлектрике.

Естественно, что исследователи, в опытах которых было обнаружено запаздывание разряда, попытались оценить статистическое время запаздывания и время формирования разряда. При этом обнаружились два различных подхода к этому вопросу.

Штригель [19] производил статистическую обработку экспериментально полученных результатов при пробое твердых диэлектриков. Он строил графики, в которых по оси абсцисс откладывалось время запаздывания разряда, а по оси ординат вероятность этого времени запаздывания или большего. На фиг. 10 представлены графики статистической обработки для нитроцеллюлозы, пресшпана и слюды.



Фиг. 10. Графики по определению времени формирования разряда и статистического времени запаздывания по данным пробоя нитроцеллюлозы, пресшпана и слюды (по Штригелю)
1—нитроцеллюлоза толщиной 0,05 мм, ударное напряжение 18,3 кв; 2—пресшпан толщиной 0,3 мм, ударное напряжение 20 кв; 3—слюда толщиной 0,3 мм, ударное напряжение 20 кв.

Как видно, опытные точки хорошо укладываются около прямых.

Наименьшее время запаздывания принималось автором за время формирования разряда, а время запаздывания при вероятности 37% минус время формирования разряда принималось за среднее статистическое время запаздывания.

Следует считать такое определение времени формирования разряда и среднего статистического времени запаздывания необоснованным по двум основным причинам.

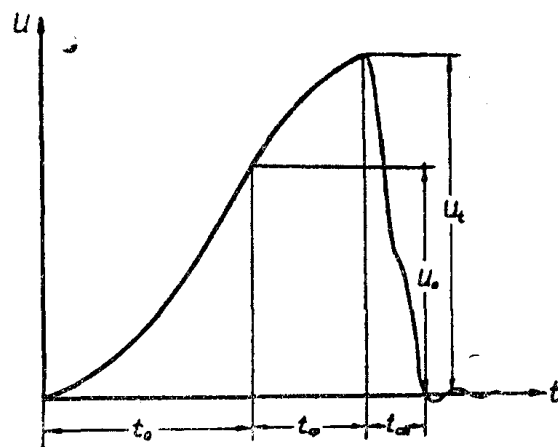
1. Не дается физического обоснования наличия в твердых диэлектриках статистического времени запаздывания. Как указывалось выше, статистическое время запаздывания вплоть до экспозиций 10^{-8} сек практически отсутствует.

2. Из вышеприведенного метода обработки результатов следует, что время формирования разряда есть наименьшее время запаздывания и поэтому является постоянной величиной, с чем нельзя согласиться

Разряд каждый раз развивается в условиях, отличных от предыдущего случая.

Аналогичный метод обработки результатов по пробоем твердых диэлектриков приняли Инуиши и Суита [5]. Поэтому приводимые ими данные для σ и τ следует считать необоснованными.

Г. А. Воробьев [3] принял, что статистическое время запаздывания в твердых диэлектриках практически отсутствует и время запаздывания разряда фактически есть время формирования разряда. В опытах Г. А. Воробьева пробой производился на фронте импульса. Определение времени формирования разряда в твердых диэлектриках производилось согласно осциллограммам пробоя, по схеме, показанной на фиг. 11, где U_0 —пробивное напряжение при той экспозиции, когда уже не сказывается влияние запаздывания разряда на пробивное напряжение и еще нет влияния объемных зарядов. Этому условию удовлетворяла экспозиция $4 \cdot 10^{-7} \div 6 \cdot 10^{-6}$ сек. В опытах Г. А. Воробьева [3] было установлено, что при экспозициях, когда сказывается влияние разряда, разброс в значениях электрической прочности отдельных образцов значительно больше, чем при больших экспозициях. В последнем случае разброс в значениях



Фиг. 11. График к определению времени формирования разряда t_f и времени спада напряжения при пробое ($t_{сп}$).

электрической прочности кристаллов обусловлен структурными отличиями отдельных образцов. При меньших экспозициях к этому разбросу добавляется разброс из-за статистических колебаний в величине времени формирования разряда. Поэтому можно считать, что наибольшее значение электрической прочности при малых экспозициях соответствует наибольшей величине времени формирования разряда, а наименьшее значение электрической прочности — наименьшей величине времени формирования разряда.

К. М. Кевролева [12],

А. В. Астафуров [13] и

В. Д. Кучин [25] также применяли этот метод определения времени формирования разряда.

К. К. Сончик [6], пробивая кристаллы импульсами напряжения, близкими к прямоугольным, определял среднее время формирования разряда по графику типа фиг. 10. Он принял $t_{ф ср} = \tau + \sigma$ (фиг. 11).

3. Скорость распространения разряда

Инуиши и Суита [5] указывают, что при увеличении амплитуды импульса статистическое время запаздывания уменьшается, а время формирования разряда мало изменяется. Они определили вероятность появления в диэлектрике свободных электронов n_0 как величину, обратную минимальному статистическому времени запаздывания, скорость электронов v (эту величину вернее следовало назвать средней скоро-

стью распространения разряда), как отношение толщины диэлектрика к времени формирования разряда, и подвижность электронов κ . (Результаты представлены в таблице).

Т а б л и ц а

		$n_0 \left[\frac{1}{\text{сек}} \right]$		$\left[\kappa \frac{\text{см}^2}{\text{в. сек}} \right]$		$\left[v \frac{\text{см}}{\text{сек}} \right]$	
		однор. поле	неоднор. поле	однор. поле	неоднор. поле	однор. поле	неоднор. поле
Сера		$5 \cdot 10^5$	-10^7	0,2	-2	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$
КСі	10°C	$3 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^7$	0,6	$\begin{matrix} -7 \\ +1,5 \end{matrix}$	$2 \cdot 10^5$	$\begin{matrix} +8 \cdot 10^5 \\ -1 \cdot 10^6 \end{matrix}$
	180°C	10^7	$3 \cdot 10^7$	0,5	$\begin{matrix} +5 \\ -1,5 \end{matrix}$	—	—

Авторы считают скорость электронов (v) малой и предполагают, что пробой в исследованных ими кристаллах производится не одной лавиной, а несколькими.

Г. А. Воробьев [3] также определял среднюю скорость распространения разряда $v_{\text{ср}}$. Подсчитанные им средние скорости распространения разряда оказались на порядок больше, чем в опытах Инуиши и Суита [5] для хлористого калия, т. е. порядка 10^6 в/см.

Для неоднородного поля по данным Г. А. Воробьева [3] $v_{\text{ср}}$ также порядка 10^6 в/см, но в случае положительной полярности острия $v_{\text{ср}}$ в несколько раз больше, чем в случае отрицательной полярности. Такая же закономерность характерна для воздуха. Эта аналогия показывает, что в твердых диэлектриках основную роль при пробое, видимо, играет ударная ионизация.

По измерениям К. М. Кевролевой [12], А. В. Астафурова [13], К. К. Сончика [6] и В. Д. Кучина [25] $v_{\text{ср}}$ также порядка 10^6 в/см. Однако по данным А. В. Астафурова [13] $v_{\text{ср}}$ в несколько раз больше, чем у других авторов [3], [12], [6], [25]. В его опытах толщина образцов составляла 0,5—1,5 см. В воздухе скорость распространения разряда также увеличивается с увеличением межэлектродного расстояния, что связано со стримерным механизмом разряда. Возможно, что в твердых диэлектриках при толщине порядка см существует стримерный механизм разряда.

4. Эффект полярности

Под эффектом полярности при пробое диэлектриков понимают влияние полярности электрода с большей кривизной на величину пробивного напряжения. Эффект полярности связан с механизмом пробоя, что видно на примере воздуха.

Знание эффекта полярности для твердых диэлектриков может помочь в выяснении механизма разряда в них. Если принять, что пробой твердых диэлектриков — это механическое разрушение под действием электростатических сил, тогда не следует ожидать эффекта полярности.

Если принять, что пробой твердых диэлектриков обусловлен ионизационными процессами, тогда следует ожидать эффект полярности. При этом А. А. Воробьев и Н. А. Приходько [10] выдвигают 2 предположения.

1. Если процесс пробоя обусловлен холодной эмиссией из катода, то снижение пробивного напряжения должно быть при отрицательной полярности острья.

2. Если определяющую роль в процессе пробоя играет ударная ионизация, то должно быть понижение пробивного напряжения при положительной полярности острья, как и в воздухе, вследствие влияния положительного объемного заряда, образующегося около острья.

Если бы основную роль в процессе пробоя твердых диэлектриков играла электростатическая ионизация, то понижения пробивного напряжения следовало бы ожидать также при положительной полярности острья. А. А. Воробьев и Н. А. Приходько [10] брали диэлектрики в виде пластинок, на которые накладывались электроды: острое и плоское. Только в случае льда острое под давлением загонялось в лед. Для диэлектриков получены различные эффекты полярности в зависимости от вида напряжения (постоянное или импульсное) и окружающей среды. Однако можно установить в данных [10] следующую закономерность: для кристаллических диэлектриков (сера, слюда, кальцит), помещенных в воду или глицерин, на импульсном напряжении получился один и тот же эффект полярности — понижение пробивного напряжения при положительной полярности острья. Вода и глицерин имеют большую величину диэлектрической проницаемости, поэтому возможно, что в этих средах на импульсном напряжении поверхностные разряды отсутствовали и был получен истинный эффект полярности. Такой же эффект полярности получен при пробое льда. При пробое аморфных диэлектриков (стекло, парафин, эбонит) эффект полярности не обнаружен.

Понижение пробивного напряжения каменной соли при положительной полярности острья получено в опытах А. Ф. Вальтера и Л. Д. Инге [9] (фиг. 3).

В опытах Г. А. Воробьева [3], в которых было устранено влияние разрядов в окружающей среде, для всех исследованных диэлектриков получено снижение пробивного напряжения также при положительной полярности острья.

Аналогичный эффект полярности получен Инуиши и Суита [5] при пробое пластинок хлористого калия в трансформаторном масле, в неоднородном поле и обратный — при пробое пластинок кристаллов серы.

Можно сделать вывод, что в тех случаях, когда было устранено влияние окружающей среды на пробивное напряжение, получился один и тот же эффект полярности: понижение пробивного напряжения при положительной полярности острья. Это указывает, что при пробое твердых диэлектриков основную роль играет ударная или электростатическая ионизация в объеме диэлектрика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hippel A. and A. Alger R. S., Пробой ионных кристаллов электронными лавинами. *Phys. Rev.*, 76, 1, 127, 1949.
2. Трубицын А. М. Исследование импульсной электрической прочности монокристаллов некоторых щелочно-галондных солей и их твердых растворов с замещенным галондом. Диссертация, г. Томск, 1954.
3. Воробьев Г. А. Исследование электрического пробоя твердых диэлектриков при различных временах воздействия напряжения. Диссертация, г. Томск, 1956.
4. Воробьев А. А. Об электрическом пробое изолирующих кристаллов. *ЖТФ*, 10, 1183, 1940.
5. Inuishi Y., Suita T. Об электрическом пробое на постоянном и импульсном напряжении и времени запаздывания в твердых телах. *Z. Inst. El. Eng. Japan*, 74, 2, 150, 1954.

6. Сончик К. К. О времени запаздывания разряда в ионных кристаллах. Доклад на Всесоюзной конфер. по физ.-хим. свойствам диэлектриков, г. Днепропетровск, 1956.
7. Kawamura H., Ohkura H., Kikushi T. Статистическое запаздывание диэлектрического пробоя в слюде, стекле и KCl. J. Phys. Soc. Japan, 9, 541, 1954.
8. Plessner K. W. Электрическая прочность диэлектрических пленок, Proc. Phys. Soc., 60, 339, 242, 1948.
9. Вальтер А. Ф. и Инге Л. Д. Пробой диэлектриков при ударных напряжениях. ЖТФ, III, 6, 840, 1933.
10. Воробьев А. А. и Приходько Н. А. Электрический пробой диэлектриков в неоднородном поле. Труды Сиб. ФТИ, 4, 3, 112, 1936.
11. Конорова Е. А. К вопросу о статистическом запаздывании пробоя твердых диэлектриков. Изв. Томск. политехн. ин-та, 91, 73, 1956.
12. Кевролева К. М. Зависимость электрической прочности кристаллогидратов от времени воздействия напряжения и кристаллографического напряжения, (настоящий сборник).
13. Астафуров А. В. Вольтвременные характеристики речного льда в больших толщинах. Изв. Томского политехн. ин-та, том 94, в печати.
14. Вальтер А. Ф. и Инге Л. Д. Пробой стекла в неоднородном электрическом поле. ЖТФ, 6, 6, 33, 1929.
15. Keller K. J. Пробой и электропроводность стекла, Physica, XVII, 5, 511, 1951.
16. Vermer J. Импульсная электрическая прочность стекла пирекс. Physica, XX, 6, 313, 1954.
17. Воробьев А. А. и Вальтер А. Ф. Пробой фарфора при ударных напряжениях. Труды 3-й Всесоюзной конференции по электроизолирующим материалам, 3, 173, 1934.
18. Биндер Л. Блуждающие волны в электрических сетях. Перевод с немецкого. Москва — Ленинград, 1935.
19. Strigel R. Электрическая импульсная прочность. Berlin, 1939.
20. Whitehead S. Электрический пробой твердых тел. Oxford, Clarendon Press, London, 1951.
21. Seitz F. К теории увеличения числа электронов в кристаллах. Phys. Rev., 76, 9, 1376, 1949.
22. Crowe R. W. Инерционность образования электрического пробоя в жидких углеводородах. J. Appl. Phys., 27, 2, 156, 1956.
23. Под ред. проф. Л. И. Сиротинского. Техника высоких напряжений, часть I, стр. 143, 1951.
24. Вальтер А. Ф. и Инге Л. Д. Влияние концентрации электронов проводимости на электрическую прочность кристаллов. ДАН СССР, 3, 2, 65, 1934.
25. Кучин В. Д. Зависимость электрической прочности ионных кристаллов от температуры. ДАН СССР, 114, 301, 1957.
26. Мельников М. А., Известия МВО СССР, «Электромеханика», в печати.

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
3	11 стр.	10^{16}	10^{-6}
9	9 св.	$5 \cdot 10^{-9}$ сек	$5 \cdot 10^{-9}$ сек
11	1 св.	$2 \div 3 \cdot 10_8$ — сек	$2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек
29	6 стр.	10^{-6} см/сек	10^6 см/сек
29	2 стр.	большой	большин
30	3 св.	10^{-6} сек	10^{-6} сек
32	6 стр.	спаянности	спайности
33	17 св.	10^{-8} сек	10^{-8} сек
34	3 св.	10^{-6} сек	10^{-6} сек
34	4,5 св.	$10^{-4} - 10^{-1}$ сек	$10^{-4} - 10^{-1}$ сек
34	19 св.	10^{-8} и 10^{-6} см/сек	10^{-8} сек и 10^6 см/сек
56	форм. 9	В конце фигурной скобки следует — 1.	
65	3 стр.	формулу	форму
91	5 св.	1350 ом и $R_T = 30$ ком	$R_T = 1350$ ом $R_T = 30$ ком
107	6 св.	$\tau = 10^{-6}$ сек	$\tau = 10^{-6}$ сек
109	16 стр.	образцов	микротвердости образцов
111	4 стр.	E	$E_{пр}$
112	рис. 9, 5 св.	поле однородное	поле неоднородное
116	12 стр.	Винчелла	Винчелл
123	7 св.	спаянность	спайность
128	32 св.	40 мол %	90 мол %
170	1 св.	ангенса	тангенс
217	15 стр.	При введении примесей типа внедрения	При введении примесей в твердые растворы типа внедрения
218	24 св.	Измерялась зависимость	Определялась зависимость
219	8 св.	хлористый рубидий	бромистый калий
219	22 стр.	хранения из монокристаллов	хранения монокристаллов
220	фиг. 2	В точке начала координат слева по оси lg z следует поставить — 12	
228	1 св.	выражение	выражение
228	5 св.	огда	тогда
228	6 св.	арфора	фарфора
228	7 св.	каркасном	в каркасном
228	8 св.	етальной	детальной
228	16 св.	гатушек	катушек
228	форм. 3	C_g	C_g
242	2 стр.	Из фиг. 1	Из диаграммы плавкости
244	11—12 стр.	рентгенограммы смещения	рентгенограммы сплава смещения
251	24 св.	с ионизованным	с ионизированным
301	7 стр.	монизирующих	ионизирующих
302	18 стр.	-процентного	50-процентного
306	9 стр.	95% монокристалла	95% плотности монокристалла
325	24 стр.	группы	II группы
332	6 стр.	$10^7 - 10^8$ ом/сек	$10^7 - 10^8$ см/сек
343	1 стр.	„438—1“	„ИЗВ—1“
394	8 стр.	Co	Co