

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОРОТКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

А. А. ВОРОБЬЕВ

Различают три формы пробоя твердых диэлектриков: тепловую, электрохимическую и электрическую. Тепловая и электрохимическая формы пробоя связаны с ионными процессами в диэлектрике. Электрическая форма пробоя описывается как электронный процесс в твердом диэлектрике, связанный с движением и взаимодействием электронов с решеткой [1].

Электрическая прочность ионных кристаллов увеличивается с возрастанием энергии решетки. Твердость, модули упругости кристаллов также возрастают с увеличением энергии решетки. Кристаллы, имеющие более высокую механическую прочность, имеют также более высокую электрическую прочность, что является следствием одинаковой зависимости электрической и механической прочности от энергии решетки.

Неоднократно предлагалось объяснить электрический пробой твердых диэлектриков как механическое разрушение их в электрическом поле.

Место пробоя диэлектрика при воздействии коротких электрических импульсов представляет собой типичную картину механического разрушения с характерным растрескиванием по краям канала. Такая картина наблюдается при хрупком разрушении материала. Если энергия импульса велика, то диэлектрик дробится на отдельные куски.

Связь между электрическим и механическим разрушением твердых диэлектриков с целью объяснения электрического пробоя механическим разрывом связей между частицами тела пытались установить неоднократно [1].

Одно из первых объяснений явления электрического пробоя твердых диэлектриков путем механического разрушения в результате разрыва связей между ионами электрическим полем было предложено Роговским [1].

Расчеты по формулам теории электростатического разрыва связей приводили к электрической прочности, на два порядка превышающей практически измеряемые величины.

Это явилось одной из основных причин отказа от теории Роговского и других аналогичных объяснений пробоя.

Лемхаус [1] предполагал, что при пробое диэлектриков на импульсах с фронтом менее чем 10^{-7} сек происходит механическое разрушение материала. Кратковременное действие электрической волны вызывает механический удар и дробящее действие.

Некоторые закономерности электрического пробоя, известные в настоящее время, позволяют вновь рассмотреть возможность механического разрушения диэлектриков в электрическом поле.

Многочисленные исследования влияния механических деформаций на электрическую прочность различных твердых диэлектриков привели к заключению о сложном влиянии вторичных процессов при деформации на электрическую прочность. Уплотнение материала при деформировании влечет повышение его электрической прочности, растрескивание сопровождается понижением электрической прочности.

Несмотря на сложность вторичных явлений как при электрическом, так и при механическом разрушениях твердых диэлектриков, все же замечена связь между одинаковым изменением электрической прочности и твердости кристаллов с изменением их энергии решетки.

Под действием электрического поля E в диэлектрике, диэлектрический коэффициент которого ϵ , возникают механические напряжения. Величина давления в дин/см^2 определяется [1] формулой:

$$P = \frac{\epsilon E^2}{4\pi}$$

Механические усилия в диэлектриках растут пропорционально напряженности поля.

В таблице представлены величина электрической прочности на постоянном напряжении и давление, высчитанное по формуле [1], возникающее в диэлектрике при таком поле.

Так как одновременно с увеличением электрической прочности щелочно-галогидных кристаллов растет и диэлектрический коэффициент их как следствие увеличения плотности вещества, то механические напряжения в этих кристаллах [1] возрастают быстрее, чем пропорционально квадрату напряженности электрического поля, как это видно на фиг. 1.

По данным В. Д. Кузнецова [2] прочность кристаллов щелочно-галогидных солей точно не определена. Прочность на разрыв кристаллов KI колеблется в пределах от 15 до 35 кг/см^2 , для KBr — от 16 до 40 кг/см^2 , для кристаллов каменной соли — от 16 до 50 кг/см^2 и т. д.

Давление, испытываемое диэлектриком перед пробоем на постоянном напряжении, только на порядок

меньше величины измеряемой механической прочности его и в несколько раз меньше, чем величина минимальной механической прочности.

С увеличением энергии решетки возрастает величина механических усилий, выдерживаемых кристаллом перед пробоем, как это следует из фиг. 2. Квадратичная зависимость, представленная на фиг. 2, является следствием приблизительно линейной зависимости между величиной электрической прочности и энергией решетки.

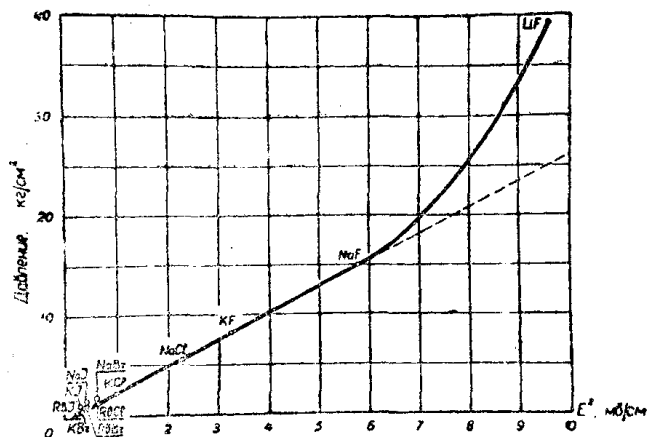
Изучалось [1] распространение разрядов в деформированных кристаллах каменной соли в различных условиях. Механические напряжения

Т а б л и ц а

Вещество	E Мв/см	P кг/см^2
LiF	3,1	39,2
NaF	2,4	15,1
KF	1,8	8,7
NaCl	1,5	5,6
KCl	1,0	2,03
RbCl	0,8	1,47
NaBr	0,8	1,69
KBr	0,7	1,03
RbBr	0,6	0,79
NaJ	0,7	1,46
KJ	0,6	0,78
RbJ	0,5	0,54

в кристаллах наблюдались оптическим методом. Электрические разряды, разрушая кристалл, не создают в нем механических напряжений.

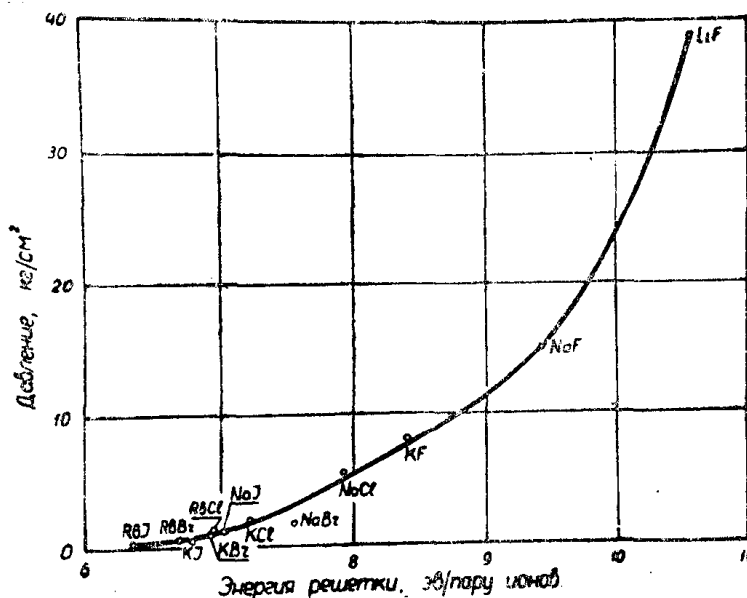
Опыты показали, что разряды в кристаллах идут по границе механи-



Фиг. 1. Зависимость механических напряжений, возникающих в кристаллах перед пробоем, от квадрата пробивной напряженности.

чески напряженных мест, где градиент механических напряжений будет наибольшим.

На фиг. 3 виден разряд с положительного острия в кристалле каменной соли и механические напряжения в нем, при наблюдении в на-

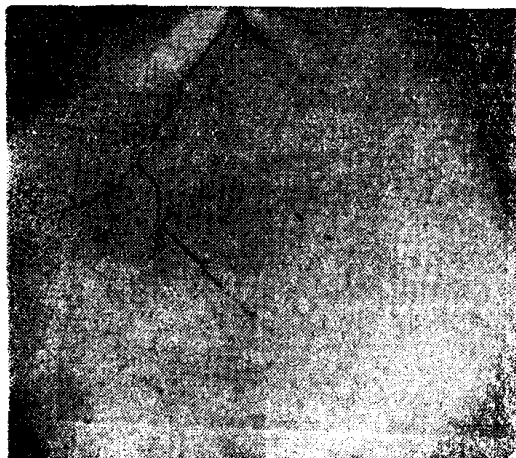


Фиг. 2. Зависимость механических напряжений, возникающих в кристаллах перед пробоем, от энергии кристаллической решетки.

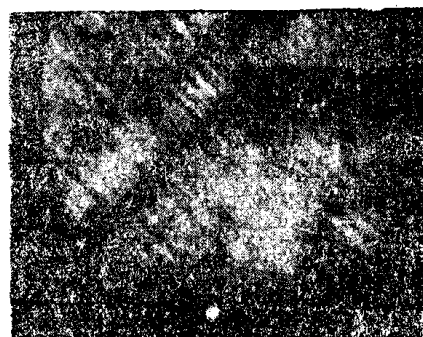
правлении, перпендикулярном распространению разряда. Разряд шел по границе области пластической деформации и, достигнув грани кристалла, отразился от нее внутрь кристалла.

На фиг. 4 видны механические напряжения в поляризованном свете после сильной пластической деформации кристалла и разряд в нем [3].

В пластически деформированных кристаллах разряд, пересекая плоскость скольжения, изменяет свое направление на ее границе. В кристаллах, мало нарушенных деформацией, разряды распространяются по границе механически напряженных объемов.

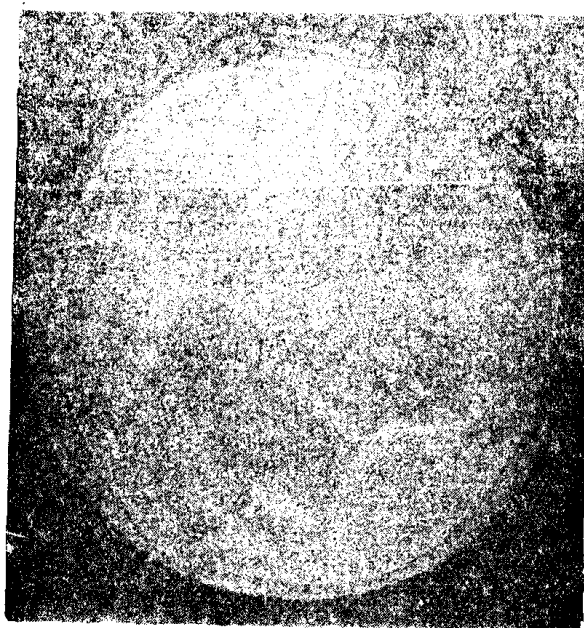


Фиг. 3. Фотография разряда в каменной соли с положительного острия при наличии механических напряжений



Фиг. 4. Механические напряжения в кристаллах при сильных полях (фотография в поляризованном свете) и электрический разряд

Купер и Уоллес [3] наблюдали возникновение пластической деформации в монокристаллах KCl в однородном электрическом поле при воздействии импульсного напряжения (50 мксек) [1]. Наблюдения произво-



Фиг. 5. Фотография наблюдаемого просветления поля в поляризованном свете при воздействии высокого напряжения

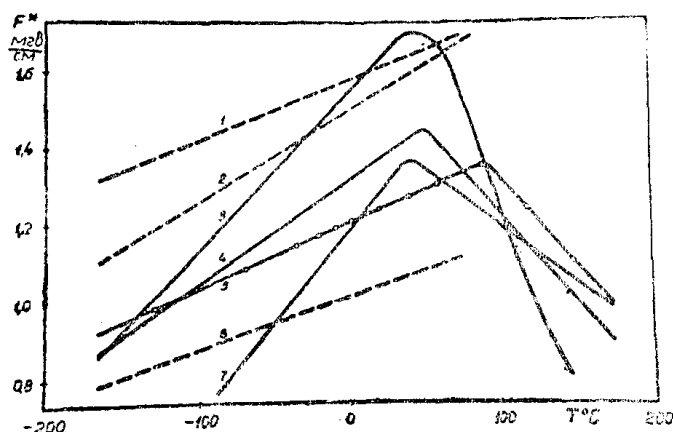
дидись при воздействии поля в направлениях грани куба, диагонали грани куба и диагонали куба. До воздействия импульса напряжения на образец механические напряжения в них оптическим методом не наблюда-

лись. Если пробой образцов вследствие их дефектности происходил при напряженности поля около $0,7 \text{ Мв/см}$, то после воздействия поля такой напряженности пластической деформации в образцах не наблюдалось. После воздействия напряженности поля порядка $0,8 \text{ Мв/см}$ и выше оптическим путем во всех образцах наблюдалась остаточная деформация, как это видно на фиг. 5. С повышением напряженности поля возрастали размеры деформированной области. Пробой образцов с более высокой электрической прочностью предшествовала и большая его деформация.

Таким образом, после воздействия электрического поля высокой напряженности в кристаллах возникают остаточные механические напряжения, и электрическому пробое кристаллов, имеющих высокую прочность, всегда предшествует пластическая деформация, а возможно, и механическое разрушение.

Согласно теории ударной ионизации электронами электрическая прочность ионных кристаллов с понижением температуры и уменьшением рассеяния электронов фононами должна уменьшаться.

На фиг. 6 представлены зависимости электрической прочности ка-



Фиг. 6. Температурные зависимости электрической прочности некоторых кристаллов щелочно-галогенидных солей.

1—по теории Хиппеля, 2—по теории Чуенкова, 3—по данным Хиппеля и Алжера, 4—по данным Калдервуда и Купера, 5—по данным В. Д. Кучина, 6—по теории Фрелиха, 7—по данным Буеля и Хиппеля.

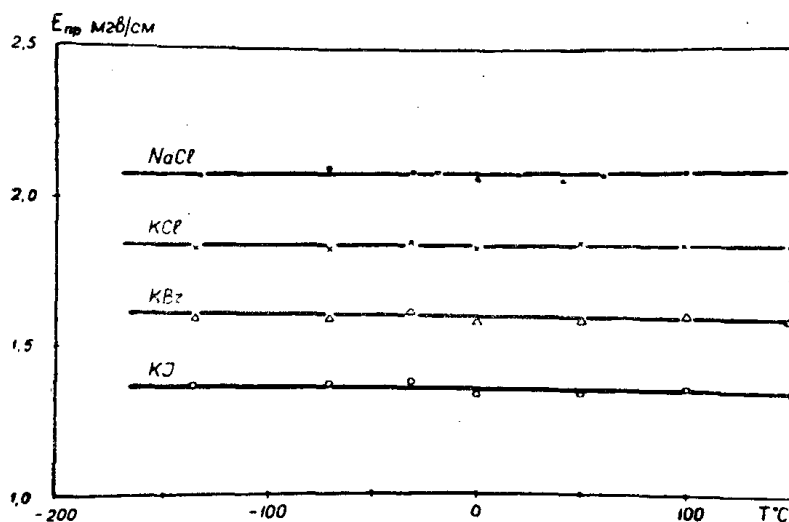
менной соли от температуры на постоянном напряжении по теориям Фрелиха [1] и В. А. Чуенкова [4] и по экспериментальным данным различных авторов [1], [4]. В области высоких температур после достижения максимального значения электрическая прочность с повышением температуры понижается вследствие теплового пробоа.

Экспериментально наблюдаемое возрастание электрической прочности ионных кристаллов с повышением температуры на постоянном напряжении при тепловом и электрическом пробое каменной соли согласуется с теоретически ожидаемой зависимостью.

На фиг. 7 представлена зависимость электрической прочности от температуры для монокристаллов NaCl, KCl, KBr и KI при пробое на коротких импульсах с длиной фронта $3 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$ по измерениям В. Д. Кучина [5].

Величина электрической прочности ионных монокристаллов повышается с увеличением энергии решетки и не зависит от температуры в исследованном интервале.

Независимость электрической прочности кристаллов от температуры в широком интервале при коротких электрических импульсах противоречит теории ударной ионизации электронами и находится в согласии с выводами теории электростатической ионизации.



Фиг. 7. Температурные зависимости электрической прочности монокристаллов NaCl, KCl, KBr и KI, полученные при экспозиции $3 \cdot 10^{-8}$ сек.

Старк и Гартон [6], измеряя электрическую прочность полиэтилена, облученного электронами с энергией 4 Мэв дозой 150—300 мкрад, обнаружили, что изменение электрической прочности полиэтилена с температурой аналогично изменению модуля Юнга от температуры.

Из сравнения теоретических и экспериментальных результатов авторы пришли к заключению, что в исследованном случае имеет место новая форма пробоя, связанная с механической деформацией диэлектрика.

При действии кратковременного импульса напряжения 10^{-8} сек, когда электрическая прочность в несколько раз превышает статическую, возникающие в диэлектрике механические усилия вызывают его разрушение прежде, чем разовьются предпробивные электронные процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев А. А. и Завадовская Е. К. Электрическая прочность твердых диэлектриков Г. И. Т. Т.Л., 1956.
2. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Изд. «Красное Знамя», Томск, 1941.
3. Cooper R. and Wallace A. A. Proc. Phys. Soc. B. 66, 1113, (1953).
4. Чуенков В. А. Изв. Томского политехн. ин-та, 91, 45, 1956.
5. Кучин В. Д., ДАН СССР, 114, 301, 1957.
6. Stark K. H., Garton C. G. Nat 176, № 4495, 1225, 1955.