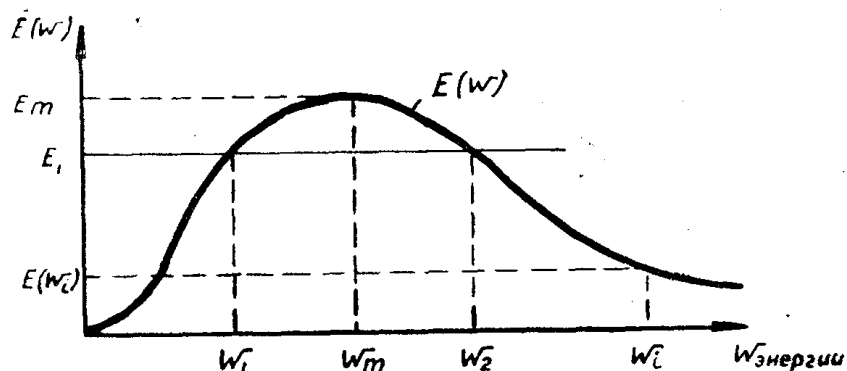


## ЗАМЕЧАНИЯ К ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПО ХИППЕЛЮ

Е. К. ЗАВАДОВСКАЯ

Полуэмпирическое объяснение электрического пробоя твёрдых диэлектриков, предложенное Хиппелем [1], отличается глубокой физической трактовкой вопроса и значительным экспериментальным и теоретическим материалом, привлечённым к объяснению явления. По Хиппелю пробой развивается вследствие ударной ионизации, вызываемой электронами проводимости. В ионизационной теории электрическую прочность диэлектрика определяют как равновесную напряжённость электрического поля, когда энергия, накапливаемая электроном в электрическом поле, равняется энергии, передаваемой электроном колебаниям решетки. Медленные электроны, двигаясь в ионной кристаллической решетке, вследствие поляризации, взаимодействуют с её узлами. Электроны теряют часть своей энергии на возбуждение колебаний решётки. Ускорение электронов будет возможно, если прирост энергии электронов во внешнем электрическом поле компенсирует потерю ими энергии, затрачиваемую на возбуждение узлов решётки.

Величина энергии, передаваемая электронами на возбуждение решётки, зависит от скорости электронов. Медленные электроны передают решётке мало энергии, так как их энергия мала. Быстрые электроны передают уз-



Фиг. 1. Равновесная напряженность поля  $E(w)$  как функция энергии электронов проводимости

лам решётки мало энергии, потому что время взаимодействия электрона с узлом решётки невелико. Таким образом, энергия, передаваемая электроном решётке, рассматриваемая в зависимости от величины энергии электрона, имеет максимум. Соответственно и напряженность внешнего поля, за счёт энергии которого происходит накопление энергии электронов, тоже проходит через максимум, как это изображено на фиг. 1.

Величина этого максимума соответствует по Хиппелю энергии собственных колебаний ионов решётки, вычисляемой по частоте остаточного излучения, или является кратным от числа квантов энергии собственных колебаний решётки.



Хиппель рассмотрел условия, при которых любой электрон, двигаясь в электрическом поле от одного узла решётки до другого, накапливает энергии больше, чем он передает её на возбуждение колебаний.

Условием пробоя по Хиппелю является возможность накопления энергии электроном в поле и возрастание его скорости вплоть до производства ионизации. Определяющим для пробоя является ионизация и нарастание электронного тока, а не взаимодействие электронов с решёткой.

Равновесная напряжённость поля  $E_m(W)$  соответствует в этом случае энергии довольно медленных электронов  $W_m$ . Это условие пробоя в литературе получило название критерия пробоя с „малой энергией электронов“.

Условие пробоя ионных кристаллов по Хиппелю записывается в виде:

$$eE_{np} a_0 = c h \nu_{ост}, \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $E_{np}$  — электрическая прочность,

$a_0$  — постоянная решётки,

$\nu_{ост}$  — частота колебаний остаточных лучей и

$c$  — постоянная порядка 1,7.

Другой критерий пробоя предложил Фрелих [2]. Он учитывает, что электроны при своём столкновении испытывают столкновения с фонами решётки, поэтому прирост их энергии будет пропорционален квадрату напряжённости поля, как это имеет место в теории проводимости. Накопление энергии имеет место только для быстрых электронов.

Ударная ионизация начнётся тогда, когда электроны накопят необходимую энергию  $W_i$ . Вначале установится равновесие между ионизацией и рекомбинацией. При увеличении поля выше равновесной напряжённости поля  $E(W_i) = E(W)$  произойдёт пробой. Таким образом, по Фрелиху пробой происходит при высоком значении энергии электронов, равной энергии ионизации. Электрическая прочность диэлектриков, определяемая по критерию Фрелиха, получается ниже, чем электрическая прочность, определяемая по критерию Хиппеля (фиг. 1).

Франц [3] считает, что пробой развивается тогда, когда плотность электронного тока через диэлектрик достигает величины около  $1 \text{ а/см}^2$ .

Предложено [4] вычислять величину электрической прочности диэлектрика из условия минимума функции, определяющей зависимость подвижности электронов от напряжённости поля.

Пользуясь этим последним критерием пробоя, вычислим величину электрической прочности кристаллов щёлочно-галогидного ряда в предположении, что энергия электронов равняется энергии собственных колебаний ионов решётки. Рассмотрим переход электрона из одного равновесного состояния вблизи положительного иона в другое, соседнее, при температуре абсолютного нуля. Переход совершается в направлении ребра куба при неизменном запасе энергии электрона. Два соседних положения равновесия для электрона расположены на расстоянии  $2 a_0$  ( $a_0$  — постоянная решётки) друг от друга и разделены потенциальным барьером высотой  $U_0$  около отрицательного иона. Вероятность перехода электрона через барьер

при каждом колебании составит  $e^{-\frac{U_0}{W_k}}$  или же  $\nu e^{-\frac{U_0}{W_k}}$  за одну секунду,

где  $\nu$  — частота собственных колебаний электрона, а  $W_k$  — его энергия.

Если в диэлектрике имеется электрическое поле  $E$ , то потенциальный барьер для электронов в направлении ускоряющего поля снижается на величину  $\frac{E \cdot e \cdot a_0}{\epsilon_0}$ , где

$a_0$  — расстояние от максимума потенциального барьера до его минимума и  $\epsilon_0 = n^2$ , где  $n$  — коэффициент преломления.

Вероятность перехода электрона при одном колебании составит  $e^{-\frac{U_0 - E' e a_0}{W_k}}$  или за секунду

$$\nu_1 = \nu \cdot e^{-\frac{U_0 - E' e a_0}{W_k}}, \text{ где } E' = \frac{E}{\epsilon_0}.$$

Плотность тока определится из условия:  $i = n \cdot e \cdot \delta \cdot \nu$ , где  $\delta$  — величина смещения электронов в диэлектрике или из условия:  $i = n e U E'$ , где  $U$  — подвижность электронов. Отсюда получим:

$$U = \frac{\delta \cdot \nu}{E'} \cdot e^{-\frac{U_0 - E' a_0 e}{W_k}}.$$

Из условия минимума подвижности получим выражение для определения электрической прочности в виде:

$$E_{np} = \frac{W_k \epsilon_0}{e a_0}. \quad (2)$$

При  $W_k = h \nu_{осм}$  получим:

$$E_{np} = \frac{h \nu_{осм} \epsilon_0}{e \cdot a_0}. \quad (3)$$

Таким образом, теоретически получена формула для вычисления электрической прочности, имеющая такой же вид, как формула, полученная Хиппелем. Найденная им экспериментально постоянная  $C$  в данном случае имеет физический смысл  $C = \epsilon_0$ .

В таблице приведены результаты вычислений по формуле (3) при подстановке в неё экспериментально определённых величин кванта энергии остаточного излучения, постоянной решётки и диэлектрического коэффициента. Экспериментально измеренное значение электрической прочности приводится по литературным данным [5]. Эти данные близко совпадают с полученными нами. В худшем случае расхождение между величинами электрической прочности, измеренной и подсчитанной по экспериментальным данным с помощью формулы (3), не превышает 55%. Представляет также интерес и полученная зависимость величины электрической прочности от характеристик диэлектрика ( $a_0$ ,  $\epsilon_0$  и  $h \nu_{осм}$ ), определяемая формулой (3) и совпадающая с экспериментальными данными, приведёнными в таблице.

Т а б л и ц а

№ п. п.	Название вещества	$E_{np}$ Мв/см		Постоянная решётки $\times 10^8$ см	Диэлектрический коэффициент $\epsilon_0 = n^2$	Энергия собственных колебаний, эксперим эл-вх $10^{-2}$
		эксперимент	вычисленная по (3)			
1	Li F	3,1	3,6	2,01	1,92	3,74
2	Na F	2,4	2,3	2,31	1,74	3,06
3	K F	1,8	1,6	2,67	1,85	2,33
4	Na Cl	1,5	1,62	2,81	2,25	2,03
5	K Cl	1,0	1,18	3,14	2,13	1,74
6	Rb Cl	0,7	0,98	3,27	2,19	1,45
7	Na Br	1,0	1,55	2,98	2,62	1,74
8	K Br	0,7	1,1	3,29	2,33	1,52
9	Rb Br	0,6	0,73	3,43	2,33	1,07
10	Na I	0,8	1,12	3,23	2,51	1,45
11	K I	0,6	0,92	3,53	2,69	1,20
12	Rb I	0,5	0,68	3,66	2,63	0,95

В приведённой выше работе Франца для вычисления величины электрической прочности диэлектриков при пробое, вследствие ионизации полем, получена формула

$$E_{np} \sim \frac{m a_0 W i^2}{240 e \hbar^2}. \quad (4)$$

Квадратичная зависимость электрической прочности от величины энергии ионизации, определяемой по краю собственного поглощения в ультрафиолетовой части спектра, наблюдалась ранее [7].

Выражаю благодарность проф. А. А. Воробьеву за обсуждение затронутых в статье вопросов.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. Hippel Appl. Phys. 8, 815, 1937.
2. H. Fröhlich Proc. Roy. Soc. A. 160, 230, 1937.
3. W. Franz Naturwissen 39, 1, 18, 1952.
4. Е. К. Завадовская, ДАН, 82, 4, 565, 1952.
5. Н. Мотт и Р. Герни. Электронные процессы в ионных кристаллах. И. Л. 1950. стр. 226.
6. Е. К. Завадовская. ДАН (в печати).
7. А. А. Воробьев. Техника высоких напряжений, ГЭИ, 1945.