

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ ИЗ УСЛОВИЯ МИНИМУМА ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ

А. А. ВОРОБЬЕВ, Е. К. ЗАВАДОВСКАЯ

Высказана гипотеза, что подвижность электронов в диэлектрике перед пробоем уменьшается. Из условия минимума функции, описывающей зависимость подвижности от напряженности поля, получены формулы для вычисления электрической прочности кристаллов. Электрическая прочность выражена через характеристики решетки и энергию электрона. Вычисленные значения величины электрической прочности для кристаллов щелочно-галогидных солей близко подходят к измеренным.

### Введение

В диэлектрике при высокой напряженности поля происходят сложные физические процессы, заканчивающиеся его пробоем. Разрушение твердой структуры диэлектрика наступает, вероятно, потому, что электроны, участвующие в переносе тока, часть своей энергии, получаемой от внешнего поля, передают решетке. Когда энергия, передаваемая от электронного потока узлам решетки, становится сравнимой с энергией решетки, то наступает разрушение связей между узлами—пробой диэлектрика.

Процесс пробоя характеризуется усиленной передачей энергии от электронов решетке и должен сопровождаться уменьшением их скорости. Так как уменьшение скорости движения электронов наступает при возрастающем электрическом поле, то, следовательно, уменьшается их подвижность [1].

Таким образом, перед пробоем должно иметь место уменьшение подвижности электронов в диэлектрике. Подвижность электронов в твердых диэлектриках должна зависеть от напряженности поля. Это имеет место в газах. Величина пробивной напряженности электрического поля может быть найдена из условия минимума функции, определяющей зависимость подвижности электронов от напряженности поля.

Давыдов [2] показал, что в полупроводниках подвижность электронов уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из напряженности поля. По измерениям Пружининой-Грановской [3] следует, что в слюде, в интервале напряженностей поля  $10^5$ — $10^6$  в/см, подвижность электронов уменьшается обратно пропорционально напряженности поля.

Недавно [4] были описаны опыты, показавшие, что подвижность электронов в германии при высоких полях уменьшается обратно пропорционально напряженности поля. Приведем некоторые простые расчеты, показывающие, что подвижность заряженных частиц в решетке может зависеть от напряженности поля. Уменьшение подвижности  $u$  носителей тока по условию  $u \sim E^{-1}$  приведет к току насыщения, так как  $i = uenE$ . Такое явление наблюдалось Хиппелем [5] при фотопроводимости в окрашенных кристаллах КСl. Как видно на фиг. 1, в этих кристаллах при на-

пряженности поля порядка  $600 \text{ кВ/см}$  и выше наблюдался ток насыщения. Пробой этих кристаллов происходит при напряженности поля  $\sim 1000 \text{ кВ/см}$ .

Средний свободный пробег  $\delta$  электрона в кристалле зависит от состава кристалла, температуры, концентрации ловушек и напряженности поля  $E$ . Измерения величины среднего свободного пробега электрона в кристаллах щелочно-галогидных солей и алмазе производились при различных температурах и напряженностях поля порядка

нескольких тысяч  $\text{в/см}$ .

В этой области измерений установлено для многих ионных кристаллов линейное увеличение среднего свободного пробега электронов с возрастанием поля:  $\delta = cE$ . По данным Хехта, определявшим величину  $\delta$  по методу светового зонда, для кристаллов  $\text{AgCl}$  при поле  $104\text{--}312 \text{ в/см}$  величина  $c = 2,5 \cdot 10^{-3}$ , при поле  $5 \cdot 10^3 \text{ в/см}$  и температуре  $t = 196^\circ\text{C}$   $c = 2,2 \cdot 10^3$ .

По Лефельду для  $\text{AgCl}$  при  $t = 170^\circ\text{C}$  и поле, изменявшимся от  $20$  до  $300 \text{ в/см}$ , величина  $c = 0,04$ . Для  $\text{TlBr}$  при  $-70^\circ\text{C}$  и поле  $20\text{--}300 \text{ в/см}$  получено  $c = 0,022$ . В поле  $5 \cdot 10^3 \text{ в/см}$ , температуре  $-196^\circ\text{C}$  для  $\text{TlBr}$   $c = 1,24 \cdot 10^{-3}$ . Сопоставлять полученные величины для коэффициента пропорциональности  $c$ , полученные при разных температурах, и для кристаллов с разной концентрацией примесей затруднительно. Для кристаллов  $\text{LiF}$  по этим измерениям средний пробег вторичных электронов при температуре  $300^\circ\text{K}$  в поле, где

$$E = 5 \cdot 10^3 \text{ в/см} \text{ составит:}$$

$$\delta = cE = 0,11 \cdot 5 \cdot 10^3 = 5,5 \cdot 10^2 \text{ см.}$$

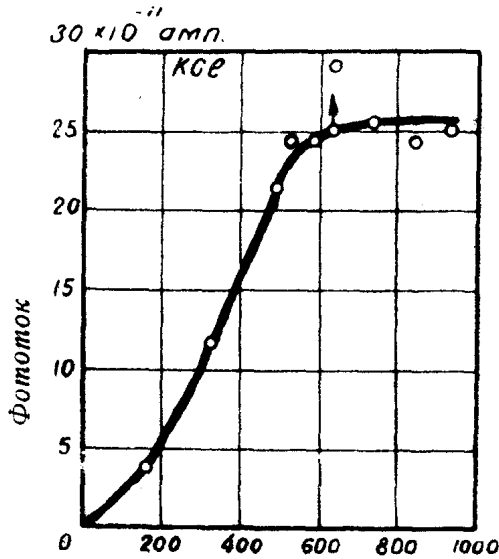
Считая, что при пробое электроны перебрасываются из  $F$  полосы, отстоящей от полосы проводимости в кристаллах  $\text{LiF}$  на  $4,95 \text{ эВ}$ , получим, что в поле  $E_{пр} = 3,1 \text{ мВ/см}$  электроны должны сместиться на величину

$$\delta = \frac{4,95}{eE} = \frac{4,95}{3 \cdot 10^6} = 1,65 \cdot 10^{-6} \text{ см.}$$

Такое значительное уменьшение средней длины свободного пробега электронов при напряженности поля, равной пробивной, может быть вызвано либо уменьшением подвижности электронов вследствие усиления их взаимодействия с решеткой, либо возрастанием концентрации ловушек, либо одновременным действием обеих причин.

Рассмотрим переход электрона из одного равновесного состояния в другое при температуре абсолютного нуля. Два соседних положения равновесия для электрона расположены на расстоянии  $2a$  друг от друга и разделены потенциальным барьером высотой  $u_0$ .

Вероятность перехода из одного равновесного положения в другое при каждом колебании составляет для электрона  $e^{-u_0/\omega_k}$  или же  $\nu e^{-u_0/\omega_k}$  за одну секунду, где  $\nu$  — частота собственных колебаний электрона и  $\omega_k$  — энергия электрона. Если в диэлектрике имеется электрическое поле напряженности  $E'$ , то потенциальный барьер в направлении действия ускоряющего



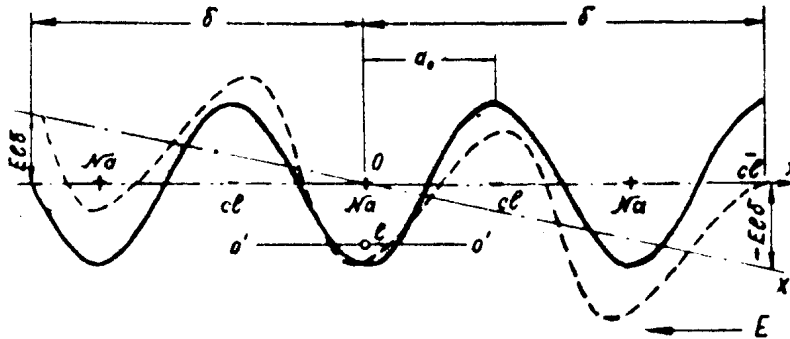
Напряженность электрического поля  $\text{кВ/см}$ .  
Фототок в функции напряженности поля в кристаллах  $\text{KCl}$  при облучении зеленой линии ртутной лампы ( $\lambda = 5461 \text{ \AA}$ )

Фиг. 1. Ток насыщения в окрашенных кристаллах  $\text{KCl}$  при фотопроводимости

поля снижается относительно положения равновесия на величину  $E'ea$ , где  $a$  является расстоянием между положением равновесия и максимумом потенциального барьера, а  $e$  — заряд электрона или дырки и

$$E' = E \varepsilon_0, \quad a \varepsilon_0 = n^2,$$

где  $E'$  — средняя расчетная величина напряженности поля и  $\varepsilon_0$  — оптиче-



Фиг. 2. Изменение периодического распределения потенциальной энергии для электрона в кристаллической решетке при воздействии постоянного электрического поля.

ская часть диэлектрического коэффициента. Вероятность перехода электрона в направлении ускоряющего поля при одном колебании составит

$$e^{-\frac{u_0 - E'e.a}{\omega_k}}$$

Частота переходов электронов в секунду составит

$$\nu_1 = \nu e^{-\frac{u_0 - E'e.a}{\omega_k}}, \quad (1)$$

где  $\nu$  — частота колебаний электрона на гребне потенциального барьера.

В противоположном направлении частота переходов для электронов составит

$$\nu_2 = \nu e^{-\frac{u_0 + E'e.a}{\omega_k}}. \quad (2)$$

Суммарное число переходов электронов в направлении ускоряющего поля и противоположном составит

$$\Delta\nu = \nu \left( e^{-\frac{u_0 - E'ea}{\omega_k}} - e^{-\frac{u_0 + E'ea}{\omega_k}} \right). \quad (3)$$

Плотность тока определяется выражением:  $i = n.e.\Delta\nu.\delta$ , где  $n$  — число электронов в единице объема. Имеем

$$i = ne\delta\nu \left( e^{-\frac{u_0 - E'ea}{\omega_k}} - e^{-\frac{u_0 + E'ea}{\omega_k}} \right). \quad (4)$$

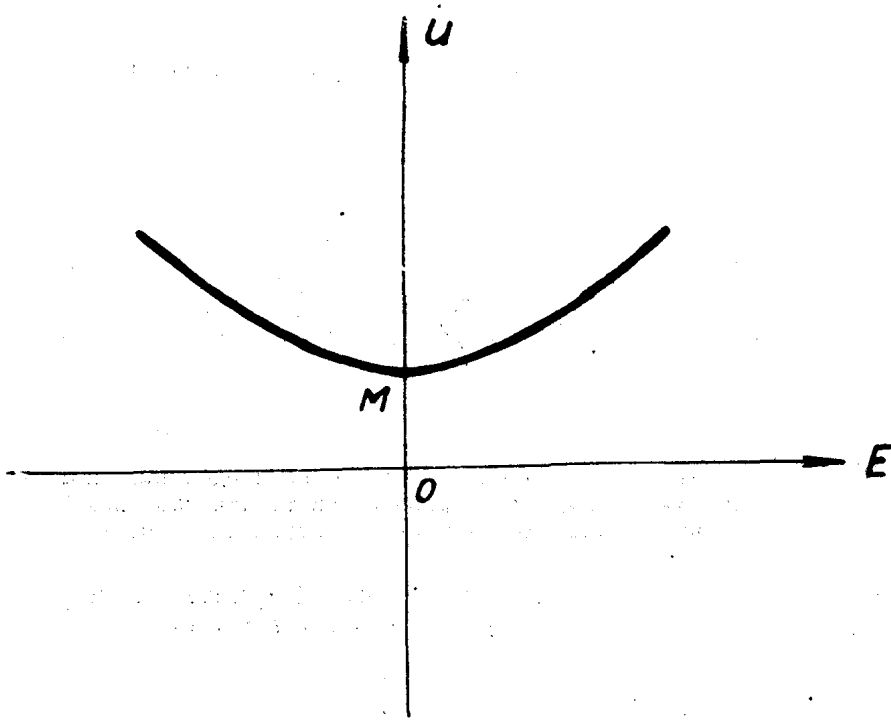
Подвижность электронов  $u$  определим из условия  $i = ne\delta\Delta\nu = neuE'$ , где  $\delta$  — расстояние, на которое смещается электрон в диэлектрике, откуда

$$u = \frac{\partial\Delta\nu}{E'} = \frac{\delta\nu}{E'} \left( e^{-\frac{u_0 - E'ea}{\omega_k}} - e^{-\frac{u_0 + E'ea}{\omega_k}} \right). \quad (5)$$

Исследуем изменение функции  $u$  в зависимости от  $E'$  при некоторых частных значениях  $\omega_k$ .

## Изменение подвижности электронов в электрическом поле

По нашей просьбе А. М. Гайдамович исследовал уравнение (5) для некоторых частных случаев (фиг. 3 и 4). Если  $\omega = \text{const}$ , то функция,



Фиг. 3. Изменение подвижности электронов в зависимости от поля при постоянной энергии электронов.

представляемая уравнением (5), имеет минимум при  $E=0$  (фиг. 3). Минимальное значение подвижности составляет

$$OM = \frac{2\delta\nu ae}{\omega_k} \cdot e^{-\frac{u_0}{\omega}}.$$

Предполагая, что энергия электронов линейно возрастает с увеличением поля, то есть  $\omega = mE'$ , получаем:

$$u = \frac{\delta\nu}{E'} \cdot e^{-\frac{u_0}{mE'}} \left( e^{\frac{ae}{m}} - e^{-\frac{ae}{m}} \right) = \frac{B}{E'} \cdot e^{-\frac{u_0}{mE'}},$$

где

$$B = \delta\nu \left( e^{\frac{ae}{m}} - e^{-\frac{ae}{m}} \right).$$

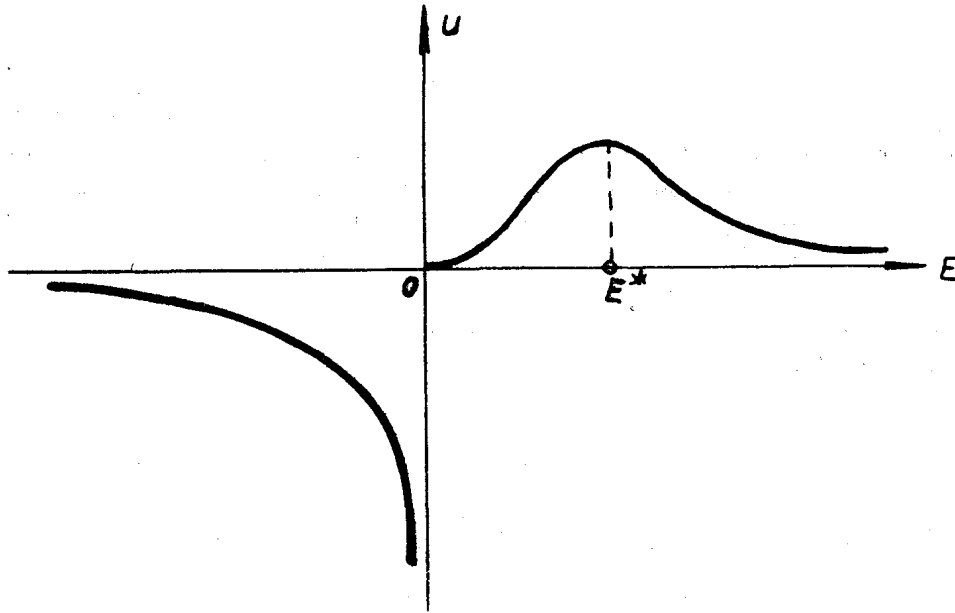
На фиг. 4 схематически изображено изменение функции  $u$  при изменении напряженности поля  $E'$ .

Кривая, расположенная в третьем квадранте, показывает уменьшение подвижности с увеличением тормозящего действия электрического поля.

Кривая, расположенная в первом квадранте, показывает сложный характер зависимости подвижности электронов от напряженности электрического поля. Вначале с увеличением напряженности электрического поля подвижность электронов растет. Подвижность достигает наибольшего значения при напряженности поля, определяемой условием:  $E^* = \frac{u_0}{m}$ . По-

следующее увеличение напряженности поля сопровождается уменьшением подвижности электронов.

Рассмотрим частные решения уравнения (5) при некоторых дополнительных условиях.



Фиг. 4. Изменение подвижности электронов в зависимости от поля при условии линейного возрастания энергии электронов в поле.

1. Допустим, что энергия электрона равняется тепловой и в направлении действия поля составляет  $w_k = KT = \text{const}$ ; тогда уравнение (5) запишем в виде

$$u = A \frac{shbE'}{E'} \quad (6)$$

где

$$A = 2 \delta v e^{-\frac{u_0}{KT}} \quad \text{и} \quad b = \frac{a_0 e}{KT}.$$

Рассмотрим изменение производной функции  $u$ . В этом случае, считая, что  $e^{-bE'} \sim 0$ , получим

$$u' = \left( \frac{b}{E'} - \frac{1}{E'^2} \right) \frac{A e^{bE'}}{2} \quad (7)$$

Вторая производная

$$u'' = \left( \frac{b^2}{E'} - \frac{2b}{E'^2} + \frac{2}{E'^3} \right) \frac{A e^{bE'}}{2}.$$

Из этих выражений следует, что функция  $u$  при значении  $E' = 1/b$  имеет минимальное значение.

Из (7) определяем

$$E' = \frac{1}{b} = \frac{KT}{ea} \quad (8)$$

При пользовании этой формулой для вычисления электрической прочности необходимо учесть, что величина напряженности поля в диэлектрике, которую мы вычисляли, вследствие поляризации меньше средней расчет-

ной напряженности поля в  $\varepsilon$  раз. Введя эту поправку для определения электрической прочности диэлектрика, получим формулу

$$E_{np} = \frac{KT\varepsilon_0}{ea}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_0$  — доля диэлектрического коэффициента за счет смещения электронов. В кристаллах типа каменной соли движение электронов происходит преимущественно по направлению диагонали грани. Вдоль этого кристаллографического направления, по которому располагаются положительные или отрицательные ионы, потенциальная энергия электронов сохраняет наименьшее значение. В этом направлении расстояние между двумя соседними и одноименными ионами составит  $\sqrt{2}a$ . С указанными поправками для вычисления величины электрической прочности каменной соли получим формулу

$$E_{np} = \frac{KT\varepsilon_0}{ea\sqrt{2}}. \quad (10)$$

По этой формуле для каменной соли получаем

$$E_{np} = \frac{1,4 \cdot 10^{-16} \cdot 300 \cdot 2,25 \cdot 300}{4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 2,81 \cdot 10^{-8} \cdot 1,41} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ в см},$$

т. е. величину, находящуюся в удовлетворительном совпадении с измеренной опытным путем. В сильном электрическом поле электроны могут накопить энергию  $\psi_k$ , значительно превышающую их среднюю тепловую  $3/2 KT$ . Вообще, вследствие этого функция распределения электронов будет сильно отличаться от равновесной максвелловской. Это должно быть учтено при более точном рассмотрении задачи.

2. Интересно сопоставить предлагаемую гипотезу с другими, высказанными ранее. Хиппель [5] рассмотрел вопрос о взаимодействии электрона с колебаниями решетки. Его интересовало накопление электроном энергии, необходимой для производства ударной ионизации в решетке. Для этого нужно было найти условия, когда становится возможным накопление энергии электроном при движении его в электрическом поле. Скорость электрона в ускоряющем поле, при которой имеет место наименьшая потеря энергии электроном, Хиппель подсчитал следующим образом. Передача энергии колебаниям решетки наиболее вероятна тогда, когда энергия движущегося заряда близка к энергии собственных колебаний ионов решетки. Известно, что энергия собственных колебаний ионов решетки определяется по остаточному излучению и составляет

$$h\nu_{ост} \sim 1 - 3,10^{-2}.$$

При таком значении энергии электронов их взаимодействие с колебаниями решетки будет наибольшим. По гипотезе Хиппеля, пока электрон на пути  $a$  накапливает в электрическом поле энергию, меньшую теряемой им на возбуждение колебаний решетки, то есть  $h\nu_{ост}$ , где  $\nu_{ост}$  — частота остаточного излучения, он не может быть ускорен. Если же электрон на участке пути, равном постоянной решетки, накапливает энергию больше, чем  $h\nu_{ост}$ , то величина энергии, передаваемая им решетке, резко уменьшается. В этом случае уменьшается также вероятность столкновений электрона с ионами.

При таких условиях становится возможным накопление электроном энергии, необходимой для производства в дальнейшем ударной ионизации.

Энергию порядка  $10 \text{ eV}$ , необходимую для производства ударной ионизации в кристалле каменной соли, электрон в поле  $E \approx 10^6 \text{ в/см}$  накапливает на пути, равном нескольким сотням междионных расстояний.

Предлагаемое нами объяснение пробоя существенно отличается от приведенного. Нам кажется, что наступление пробоя определяется условием максимального взаимодействия электрона с решеткой при переходе его из одного равновесного положения в другое и величиной его энергии.

Неучет второго члена в уравнении (5) увеличивает величину подвижности на  $e^{-1}$ . Это показывает насколько приближены наши рассуждения.

Допустим, что  $\omega_k \approx h\nu_{ост}$ .

При этом условии уравнение (9) запишется в виде

$$E_{пр} = \frac{h\nu_{ост}\epsilon_0}{ea} \quad (11)$$

В таблице представлены результаты вычислений величины электрической прочности для кристаллов щелочно-галогидных солей. Величины электрической прочности кристаллов щелочно-галогидных солей, полученные путем вычисления по формуле (11) и измеренные, удовлетворительно совпадают.

Таблица

Электрическая прочность кристаллов щелочно-галогидных солей

№ и.п.	Название вещества	$E_{пр}$ мв/см		Постоянная решетки $a_0$ $10^{-8}$ см	Диэл. коэф. $\epsilon_0 = n^2$	Энергия собствен. колебаний эксперим. $10^{-2}$ эв	$\delta = \frac{h\nu_{ост}}{eE_{пр}} 10^8$	$\frac{a_0}{\delta}$
		эксперим.	вычисл. по (10)					
1	LiF	3,1	3,6	2,01	1,92	3,74	2,5	0,81
2	NaF	2,4	2,3	2,31	1,74	3,06	2,25	1,1
3	KF	1,8	1,6	2,67	1,85	2,33	2,24	1,18
4	NaCl	1,5	1,62	2,81	2,25	2,03	3,05	0,93
5	KCl	1,0	1,18	3,14	2,13	1,74	3,7	0,85
6	RbCl	0,7	0,98	3,27	2,19	1,45	4,5	0,73
7	NaBr	1,0	1,55	2,98	2,62	1,74	4,6	0,65
8	KBr	0,7	1,1	3,29	2,33	1,52	5,0	0,65
9	RbBr	0,6	0,73	3,43	2,33	1,07	3,85	0,95
10	NaJ	0,8	1,12	3,23	2,51	1,45	4,55	0,71
11	KJ	0,6	0,92	3,53	2,69	1,20	5,4	0,65
12	RbJ	0,5	0,68	3,66	2,63	0,95	5,0	0,72

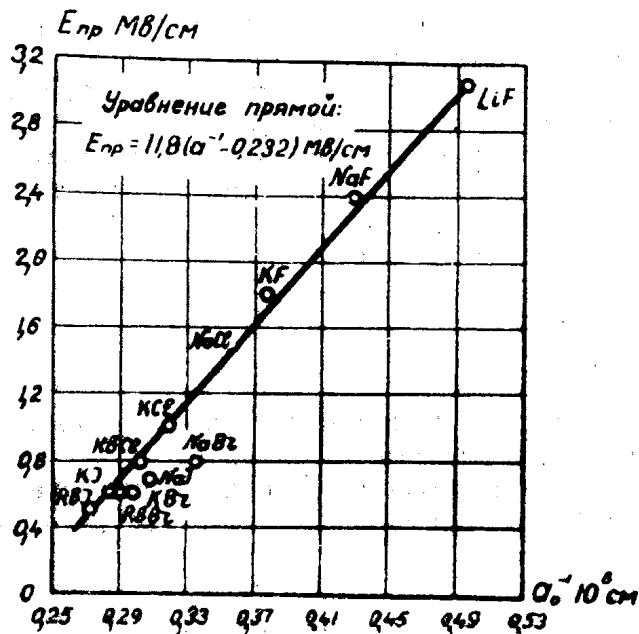
На фиг. 5, 6 и 7 представлены зависимости величины электрической прочности от энергии остаточного излучения, от постоянной решетки  $a$  и от доли диэлектрического коэффициента  $\epsilon_0$  за счет смещения электронов по экспериментальным данным. Как видно, между величиной электрической прочности  $E_{пр}$ , с одной стороны, и  $h\nu_{ост}$ ,  $a^{-1}$  и  $\epsilon_0$ , с другой, имеет место удовлетворительная линейная зависимость. Это находится в согласии с результатами наших вычислений, представленных формулой (11).

Интересно отметить, что в своей полуэмпирической теории пробоя Хиппель для вычисления величины электрической прочности пользовался формулой

$$E_{пр} = C \frac{h\nu_{ост}}{ea^2},$$

где  $C$  — коэффициент порядка 1,7, то есть двух. В приведенном нами расчете формула, составленная Хиппелем, получена в результате принятой

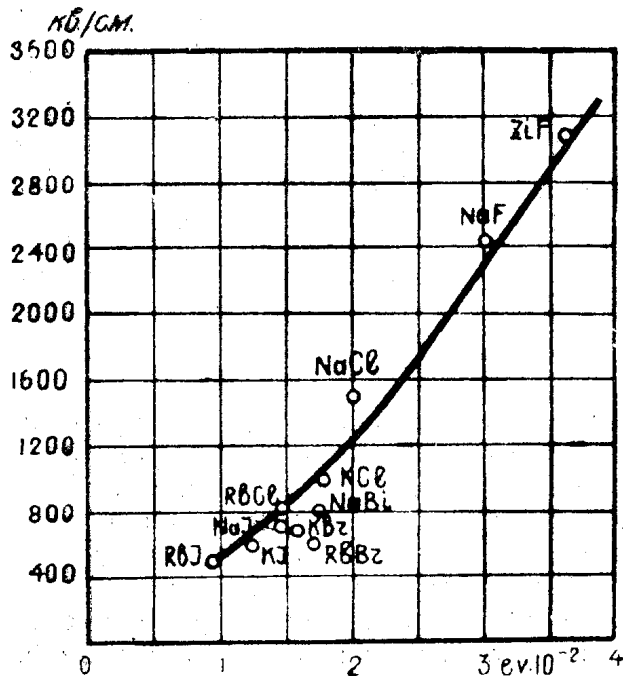
гипотезы пробоя. Коэффициент  $C$ , определенный Хиппелем эмпирически, получил физический смысл диэлектрического коэффициента и логично встал на свое место.



Зависимость электрической прочности  $E_{пр}$  от  $a_0^{-1}$

Фиг. 5. Зависимость электрической прочности кристаллов щелочно-галогидных солей от величины постоянной решетки  $a$  по экспериментальным данным.

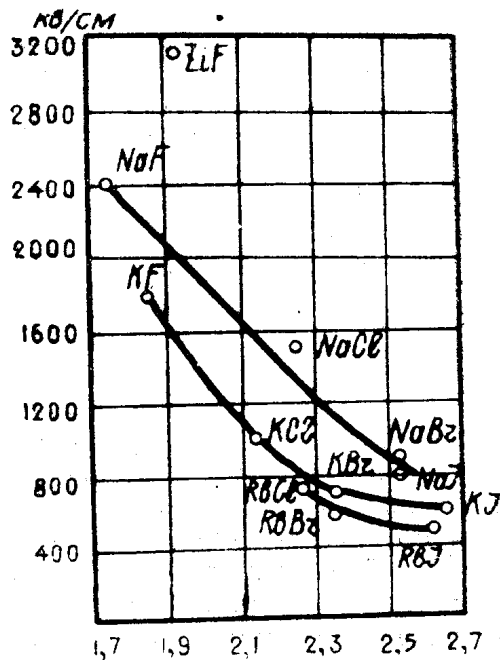
Электрическая прочность и квант энергии остаточного излучения



Квант энергии остаточного излучения в  $10^{-2} \text{ eV}$  (по измерениям)

Фиг. 6. Зависимость величины электрической прочности кристаллов щелочно-галогидных солей от величины кванта энергии остаточного излучения по экспериментальным данным.

Зависимость между электрической прочностью и диэлектрическим коэффициентом для щелочно-галогидных кристаллов



Оптическая часть диэлектрического коэффициента  $\epsilon_0$

Фиг. 7. Зависимость величины электрической прочности кристаллов щелочно-галогидных солей от величины доли диэлектрического коэффициента за счет смещения электронов по экспериментальным данным.



3. Рассмотрим случай, когда  $\omega_k = f(E)$ , например,  $\omega_k = mE$ , тогда

$$u \sim E^{-1} e^{-\frac{u_0 - aeE'}{\omega_k}} = E^{-1} e^{-nE} e^{\frac{ae}{m}} = AE^{-1} e^{-nE}, \quad (12)$$

где

$$n = \frac{u_0}{m} \quad \text{и} \quad A = e^{\frac{ae}{m}}.$$

Исследуем функцию

$$u^{-1} \sim E e^{nE}. \quad (13)$$

Очевидно, что максимум значения функции (13) будет соответствовать минимуму функции (12).

Имеем

$$(u^{-1})' = (E e^{nE})' = e^{nE} \left( 1 - \frac{n}{E} \right).$$

Поэтому из условия  $(u^{-1})' = 0$  имеем  $E = n$ ,

$$(u^{-1})'' = \frac{n}{E^2} e^{nE} > 0. \quad (14)$$

Следовательно, функция  $u^{-1}$  при  $E = n$  имеет минимум, а интересующая нас функция  $u$  при  $E = n$  имеет максимум.

Этот результат совпадает с полученным выше при рассмотрении уравнения (5).

4. Учет изменение кинетической энергии электрона, движущегося в решетке, за счет столкновения с фононами.

Для электрона, движущегося в атомной решетке [6, 7] и испытывающего столкновения с колебаниями решетки, энергия  $\omega_k$  выражается условием:

$$\omega_k = \frac{eEa}{v_{зв}} \sqrt{\frac{KT}{m}} = eEan, \quad (15)$$

где  $v_{зв}$  — скорость звука в диэлектрике,  
 $m$  — масса электрона.

Вследствие пропорциональности энергии электронов напряженности поля этот случай сводится к предыдущему.

Приведенные расчеты величины электрической прочности диэлектриков показывают, что эта величина может зависеть от температуры. Зависимость электрической прочности от температуры определяется изменением величины энергии электронов в сильном электрическом поле, постоянной решетки  $a$  и потенциального барьера для электронов  $u_0$ . Эти величины слабо зависят от температуры. Таким образом, не следует ожидать значительной температурной зависимости электрической прочности при электрическом пробое.

5. Допустим, что подвижность электронов определяется выражением

$$u = \frac{\partial \psi}{E'} e^{-\frac{u_0 - E'ea}{\omega_k}}. \quad (16)$$

В момент, предшествующий пробое, подвижность имеет минимальное значение и изменяется по условию  $u \sim E^{-1}$ . Поэтому можно записать, что

$$e^{-\frac{u_0 - ea_0 E'}{\omega_k}} = 1. \quad (17)$$

Следовательно,  $u_0 - ea_0 E' = 0$ , (18)

откуда

$$E_{np} = \frac{U_0 \varepsilon_0}{ea} \quad (19)$$

Полагая для каменной соли высоту потенциального барьера, разделяющего два соседние положения равновесия для электронов, равной  $1 \text{ ev}$ , получим

$$E_{np} = 76 \cdot 10^6 \text{ в см.}$$

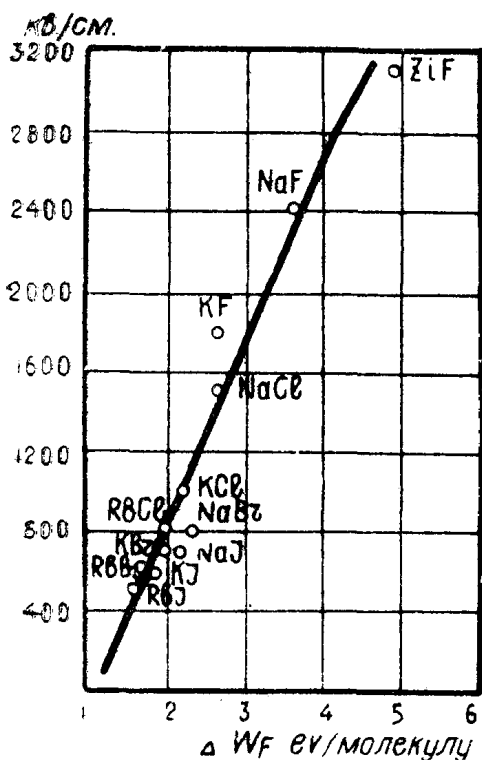
Вычисленная величина  $E_{np}$  в 40—50 раз превышает максимальное значение электрической прочности, определяемой из опыта.

Весьма высокое значение величины электрической прочности, полученное в этом случае, вероятно, является следствием чисто электростатического рассмотрения вопроса об освобождении и движении электрона.

6. Для энергии электронов в полупроводниках с ионной решеткой при сильных полях Давыдов и Шмушкевич [6] дают предельное выражение для средней энергии  $w_k = 1.5 w_i$ , где  $w_i$  — энергия (ионизации) освобождения электрона. В таком случае

Электрическая прочность и энергия  $\Delta W_F$ , соответствующая максимуму  $F$ -полосы поглощения

$$E_{np} = \frac{w_i \cdot \varepsilon_0}{5ea\sqrt{2}} \quad (20)$$



Фиг. 8. Зависимость величины электрической прочности кристаллов щелочно-галогидных солей от величины энергии связи электронов в  $F$  полосе.

Нами было показано, что для кристаллов щелочно-галогидного ряда имеет место линейная зависимость между величиной электрической прочности и энергией освобождения наиболее слабо связанных электронов  $F$  полосы [8] (фиг. 6). Полученная формула (20) находится в качественном согласии с этими результатами. Для каменной соли  $w_i = \Delta w_F = 2,65 \text{ ev}$ . По формуле (20) величина электрической прочности получается равной  $E_{np} = 0,29 \cdot 10^8 \text{ в см} = 2,9 \cdot 10^7 \text{ в см}$ .

Это значение превосходит в 20 раз определенное экспериментально и вычисленное по формуле (19). Возможно это получилось потому, что в расчете взято высокое среднее значение энергии электронов, образовавшихся вследствие ионизационных процессов. Известно [9], что подсчеты электрической прочности, произведенные другими авторами на основании представлений об ионизации, также приводили к высокому значению электрической прочности.

Таким образом, рассмотрение явления пробоя приводит к интересным следствиям. Пробой развивается при значении энергии электронов порядка энергии собственных колебаний решетки. Следовательно, в пробое участвуют не быстрые электроны, имеющие энергию порядка ионизационной, а более медленные, имеющие энергию порядка энергии собственных колебаний ионов решетки.

Неучет взаимодействия электронов с решеткой и электростатическое рассмотрение вопроса об ионизации и движении электронов в решетке приводят к весьма высоким значениям электрической прочности. Учет

взаимодействия электронов с колебаниями решетки при пробое приводит к значению электрической прочности, удовлетворительно совпадающему с определяемым экспериментально.

7. Подсчитаем среднее увеличение энергии электрона, движущегося в зоне проводимости ионного кристалла [10]. Приращение энергии электрона за секунду составит  $\Delta w = eEv$ , где  $v$  — групповая скорость. Вероятность столкновения и отклонения электрона за единицу времени можно записать в виде  $1/\tau(w)$ . Функция  $\tau(w)$ , представляющая время движения электрона до отклонения или столкновения, может быть названа временем свободного движения электрона.

Подвижность электронов, находящихся в зоне проводимости, определяется как:

$$u(w) = \frac{e}{m} \tau(w). \quad (21)$$

Скорость  $v$  сноса электронов в поле  $E$  запишется в виде

$$v = uE = \frac{e}{m} \tau(w) E. \quad (22)$$

Таким образом,

$$\Delta w = evE = \frac{e^2 E^2}{m} \tau(w). \quad (23)$$

Допустим, что вся энергия, получаемая электронами от электрического поля, скорость накопления которой представлена формулой (23), затрачивается на разрушение решетки на пробой. Величина энергии, затрачиваемой на пробой диэлектрика, определится условием

$$w_k = \Delta w \Delta t = \frac{e^2 E^2}{m} \tau(w) \Delta t, \quad (24)$$

где  $\Delta t$  — время пробоя диэлектрика.

Величина  $\tau$  в области пробоя зависит от напряженности поля  $\tau = qE^{-i}$ , где  $q$  — коэффициент пропорциональности. Поэтому энергия электронов, участвующих в передаче энергии при пробое, определится условием:

$$w_k = \frac{e^2}{m} q E \Delta t = pE,$$

где

$$p = \frac{e^2}{m} q \Delta t.$$

Таким образом, этот случай сводится к уже рассмотренному ранее.

В рассмотренном случае получим формулу для вычисления величины электрической прочности диэлектрика в виде

$$E_{np} = \frac{u_0}{p} = \frac{u_0 m \varepsilon_0}{e^2 \cdot q \cdot \Delta t}. \quad (25)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подвижность электронов в твердых диэлектриках зависит от напряженности поля.

2. Из условия минимума функции, описывающей зависимость подвижности от напряженности поля, можно получить формулы для вычисления величины электрической прочности диэлектрика.

3. Величина электрической прочности диэлектрика уменьшается с увеличением постоянной решетки и зависит от энергии электрона в решетке и диэлектрического коэффициента.

4. Неучет взаимодействия электронов с колебаниями решетки, одноэлектростатическое рассмотрение вопроса об ионизации и движении электронов в решетке приводят к неправдоподобно высоким значениям величины электрической прочности.

5. Пробой развивается при значении энергии электронов порядка энергии собственных колебаний ионов решетки.

Выражаем благодарность А. М. Гайдамович за полезные советы и обсуждение отдельных вопросов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. К. Завадовская. ДАН, XXXII, 1952.
2. Б. И. Давыдов. ЖЭТФ, 7, 9, 1039, 1937.
3. В. И. Пружинина-Грановская. ЖЭТФ, 10, 8, 878, 1940.
4. E. J. Ryder and W. Shockly Phys. Rev. 75, 310, 1949.
5. A. Hippel. Appl. Phys. 8, 815, 1937.
6. Б. И. Давыдов и И. М. Шмушкевич. УФН, XXIV, 1, 21, 1940.
7. М. Ландау и А. Компанеец. ЖЭТФ, 5, 3—4, 276, 1935.
8. А. А. Воробьев и Е. К. Завадовская. ДАН (в печати).
9. Ф. Ф. Волькенштейн. Электропроводность полупроводников, ОГИЗ, Гостехиздат.
10. А. А. Воробьев и Е. К. Завадовская. ДАН, XXXI, 3, 375, 1952.