

А. А. ВОРОБЬЕВ и Е. К. ЗАВАДОВСКАЯ

К ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 10 IX 1951)

При электрическом пробое происходит разрушение диэлектрика, разрыв связей между его частицами. Поэтому интересно произвести сопоставление величины электрической прочности с величиной, характеризующей прочность связей частиц диэлектрика между собой, величиной энергии решетки и энергией диссоциации. Для кристаллов щелочногалогенидных солей энергия ионной решетки в основном определяется кулоновскими силами взаимодействия, и ее значения известны. Если электрический пробой связан с движением электрона в электрическом поле и накоплением энергии, то можно положить, что пробой наступает при условии, когда энергия, накопленная электроном и передаваемая им решетке, достаточна для нарушений связи между ее узлами.

Рассмотрим накопление энергии электроном, движущимся в электрическом поле. Электрон с энергией ω , перемещаясь в направлении электрического поля с напряженностью E , приобретает в секунду энергию

$$\Delta\omega = eEu, \quad (1)$$

где u — групповая скорость.

Расстояние $l(\omega)$, проходимое электроном в кристалле, прежде чем он испытает отклонение, зависит от величины его энергии ω . Назовем $l(\omega)$ средней длиной свободного пробега. Вероятность столкновения и отклонения электрона за единицу времени можно написать в виде $1/\tau$. Функция $\tau(\omega)$, представляющая время движения электрона до отклонения или столкновения, может быть названа временем свободного движения электрона.

Подвижность $\nu(\omega)$ электронов, находящихся в зоне проводимости, определяется как $\nu(\omega) = \frac{e}{m} \tau(\omega)$. Скорость u сноса электронов в поле E запишется в виде:

$$u = \nu E = \frac{e}{m} \tau(\omega) E. \quad (2)$$

Таким образом, скорость накопления энергии $\Delta\omega$ (мощность) электроном, движущимся в поле, определится из

$$\Delta\omega = e\tau E^2 = \frac{e^2 E^2}{m} \tau(\omega). \quad (3)$$

Энергия, накапливаемая электроном в поле, будет им передаваться решетке и может послужить причиной нагревания диэлектрика, уве-

личения его проводимости, других возможных физических процессов и, наконец, его электрического пробоя. Допустим, что вся энергия, получаемая электронами от электрического поля, скорость накопления которой (мощность) представлена формулой (3), затрачивается на разрушение решетке. В таком случае можно написать исходное условие пропорциональности:

$$\frac{e^2 E^2}{m} \tau (w) \Delta t = \alpha U, \quad (4)$$

где Δt — время пробоя диэлектрика порядка 10^{-8} сек. и U — энергия решетки, т. е. работа, которую нужно затратить для разделения кристалла на газовые ионы при абсолютном нуле.

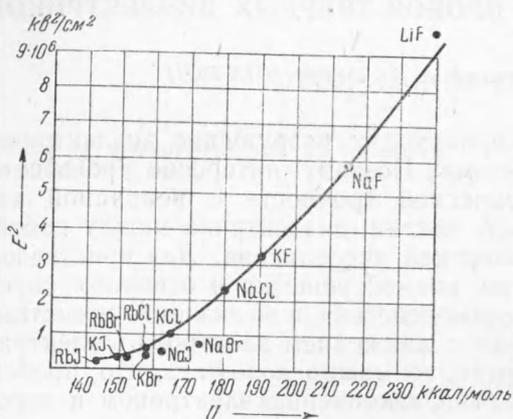


Рис. 1

прочность выбрана наибольшей из всех известных для реальных кристаллов щелочногалогидного ряда. Результаты, приведенные на рис. 1, показывают, что между E^2 и U имеет место не линейная, а более сложная зависимость.

Гипотеза, что при пробое решетка разрушается с выделением нейтральных атомов, приводит к подстановке в формулу (4) вместо энергии решетки величины энергии диссоциации. В результате получается такой же график, как на рис. 1.

Наличие квадратичной зависимости между E^2 и U (рис. 1) приводит к предположению о существовании линейной зависимости между E и U .

На рис. 2 представлена зависимость между величиной электрической прочности реальных щелочногалогидных кристаллов и энергией решетки. Большинство нанесенных точек удовлетворительно ложится на одну прямую.

Так как между величиной электрической прочности реальных кристаллов щелочногалогидных солей и энергией решетки имеется достаточно удовлетворительная линейная зависимость, представленная на рис. 2, то из (4) следует, что $\tau \approx E^{-1}$.

Учитывая удовлетворительное экспериментальное подтверждение формулы (4), можно думать, что предложенная нами схема энергетического описания электрического пробоя является в общем правильной.

При подстановке в соотношение (4) величины энергии диссоциации ожидаемой прямолинейной зависимости не получается.

Из этих данных следует, что при электрическом пробое щелочногалогидных кристаллов в канале пробоя происходит разделение решетки

Время τ , определяющее вероятность отклонения электрона от своего пути за единицу времени, сложно зависит от его энергии и среды. Принимая, что время τ не зависит от напряженности поля, получаем между энергией решетки и квадратом величины пробивной прочности диэлектрика прямолинейную зависимость, представленную уравнением (4).

На рис. 1 по оси ординат отложена величина E^2 , а по оси абсцисс — энергия решетки. Обе величины получены из измерений, причем пробивная

на ионы. Это положение вытекает из известных данных о высокой степени ионизации в газовом разряде.

Для определения энергии, накопленной электроном на длине свободного пробега, нужно величину, даваемую формулой (3), умножить на время $\tau(w)$. В этом случае получим выражение:

$$\Delta w = eEw\tau = \frac{e^2 E^2}{m} \tau^2(w). \quad (5)$$

Предположим, что при пробое вся энергия, накопленная электроном на длине свободного пробега, передается частицам решетки и затрачивается на разрушение связи между ними. В этом случае можно написать условие пропорциональности между величиной энергии, накопленной электроном в электрическом поле на длине свободного пробега, и энергией решетки (аналогичное условию (4)).

Сопоставление с экспериментальными данными, представленными на рис. 2, приводит к следствию, что

должно иметь место условие $\tau \approx E^{-1/2}$.

Представляет большой интерес изучить зависимость времени τ от напряженности поля.

В области малых полей, когда идет накопление энергии электроном, движущимся в решетке, время τ растет с полем E и уменьшается с ростом температуры. Для объяснения механизма накопления энергии электроном, движущимся в кристалле, при малых полях следует допустить, что вероятность столкновения $1/\tau$ уменьшается с ростом напряженности поля. Эта закономерность наблюдается при малых полях и малом значении кинетической энергии электрона. В области высокой напряженности поля и при больших значениях кинетической энергии электронов следует допустить, что зависимость времени свободного пробега электронов от поля изменяется. Для объяснения механизма усиленной передачи энергии от электронов решетки следует ввести гипотезу, что время τ с увеличением напряженности поля уменьшается, вероятность столкновения электронов с решеткой возрастает. Эти явления, может быть, происходят тогда, когда кинетическая энергия электронов становится сравнимой с энергией колебания узлов решетки.

Авторы выражают благодарность В. А. Жданову за дискуссию по затронутым вопросам.

Томский политехнический институт
им. С. М. Кирова

Поступило
10 IX 1951

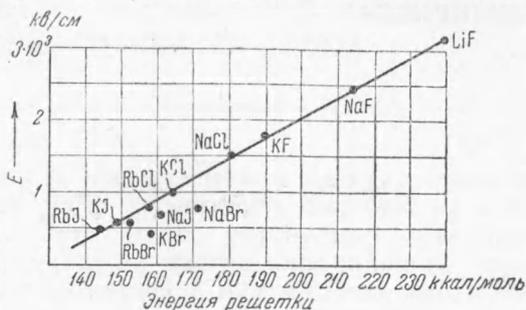


Рис. 2

¹ H. Fröhlich and N. F. Mott, Proc. Roy. Soc., **171**, 486 (1939). ² А. А. Воробьев, ЖТФ, **10**, 1183 (1940). ³ Н. Мотт и Р. Герни, Электронные процессы в ионных кристаллах, 1950.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА