

Е. К. ЗАВАДОВСКАЯ

## О СООТНОШЕНИИ МЕЖДУ ПРОБИВНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ И ПОДВИЖНОСТЬЮ ЗАРЯДОВ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 4 XII 1951)

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 мощность, передаваемая от электронного потока узлам решетки, становится равной энергии 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, 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.

Б. И. Давыдов<sup>(1)</sup> показал, что в полупроводниках подвижность уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из напряженности поля. По измерениям В. И. Пружининой-Грановской<sup>(2)</sup> следует, что в слюде в интервале напряженностей поля  $10^5$ — $10^6$  в/см подвижность электронов уменьшается обратно пропорционально напряженности поля.

В предыдущем сообщении<sup>(3)</sup> мы показали, что приблизительно линейная зависимость пробивной прочности кристаллов щелочногалогенидных солей от величины энергии решетки удовлетворительно объясняется при допущении, что подвижность электронов в этих кристаллах перед пробоем уменьшается обратно пропорционально напряженности поля. Недавно были описаны опыты<sup>(4)</sup>, 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.

Рассмотрим переход электрона из одного равновесного состояния в другое при абсолютном нуле. При этом запас энергии электрона сохраняется неизменным. Два соседних положения равновесия расположены на расстоянии друг от друга (расстояние между двумя

соседними положительными ионами) и разделены потенциальным барьером высотой  $U_0$ .

Вероятность такого перехода при каждом колебании составляет для электрона  $e^{-U_0/kT}$ , или же  $\nu e^{-U_0/kT}$  за одну секунду, где  $\nu$  — частота собственных колебаний электрона. Если в диэлектрике имеется электрическое поле напряженности  $E$ , то потенциал в направлении ускоряющего действия поля снижается относительно положения равновесия на величину  $Eea_0/2$ , где  $a_0/2 = \delta$  — расстояние между положением равновесия и максимумом потенциального барьера, а  $e$  — заряд электрона или дырки. При переходе электрона на расстояние  $\delta$  высота потенциального барьера понизится на величину  $Ee\delta$ . Вероятность перехода электрона в направлении ускоряющего поля при одном колебании составит  $e^{-\frac{U_0 - Ee\delta}{kT}}$ .

Частота перескоков электронов будет  $\nu_1 = \nu e^{-\frac{U_0 - Ee\delta}{kT}}$ , где  $\nu$  — частота колебаний электрона на гребне потенциального барьера. Частота перескоков в противоположном направлении  $\nu_2 = \nu e^{-\frac{U_0 + Ee\delta}{kT}}$ . Суммарное число перескоков в направлении ускоряющего поля и противоположном, определяющее ток:

$$\Delta v = \nu e^{-U_0/kT} (e^{bE} - e^{-bE}), \text{ где } b = e\delta / kT. \quad (1)$$

Плотность тока  $i = ne \Delta v \delta$ , где  $n$  — число электронов в единице объема. Подвижность электронов

$$\mu = \frac{i}{enE} = \frac{\delta \nu}{E} e^{-U_0/kT} (e^{bE} - e^{-bE}). \quad (2)$$

Полагая  $e^{-bE} \sim 0$ , получим, что подвижность достигает минимума при  $b = 1/E$ . Максимальная величина напряженности поля, при которой имеют место наибольшие взаимодействия электронов с решеткой и минимальная их подвижность, определяется пробой диэлектрика. В рассматриваемом случае для каменной соли  $E_{пр} = 1,81 \cdot 10^6$  в/см.

Из условия  $E_{пр} = 1/b = 2kT/ea_0$  следует, что пробивная прочность уменьшается обратно пропорционально постоянной решетки.

Исследование зависимости подвижности электронов от напряженности поля при «туннельном эффекте» показывает, что подвижность электронов вначале, до полей  $10^4$ — $10^5$  в/см, с увеличением поля растет, затем начинает уменьшаться. Величина пробивной напряженности поля, вычисленная из условия минимума подвижности электронов, приближенно равна

$$E_{пр}^* = \frac{2\pi}{ch} \sqrt{2m} U_0^{3/4}, \quad (3)$$

где  $U_0$  — величина потенциального барьера для электронов в диэлектрике. Величина электрической прочности кристаллов щелочногаллоидных солей, вычисленная по формуле (4), в 2—3 раза ниже экспериментально определенной.

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

Поступило  
7 IX 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Б. И. Давыдов, ЖЭТФ, 7, 9, 1069 (1937). <sup>2</sup> В. И. Пружинина-Грановская, ЖЭТФ, 10, 8, 878 (1940). <sup>3</sup> А. А. Воробьев и Е. К. Завадовская, ДАН, 81, № 3 (1950). <sup>4</sup> E. J. Ryder and W. Shockley, Phys. Rev., 75, 310 (1949).