

ДИСКУССИЯ ПО ДОКЛАДАМ Г. И. СКАНАВИ, Ю. А. СТАРИКИНА и В. А. ЧУЕНКОВА

А. А. Воробьев говорит:

Физические идеи, высказываемые исследователями, работы, на основе которых пытаются объяснить отдельные стороны явлений, оказываются очень полезными, их нужно ценить и приветствовать. В этом отношении интересна работа В. А. Чуенкова, в которой высказываются новые мысли, заслуживающие внимания. От развиваемой теории невозможно требовать полного объяснения всех сторон явления, но основные закономерности теория должна объяснять.

Обычная схема теорий электрического пробоя такова: ищется закон роста проводимости в зависимости от напряженности поля. Молчаливо подразумевается, что вслед за ростом проводимости произойдет пробой. Так ли развивается процесс в действительности? Каков механизм образования свободных электронов? Действительно, механизм нарастания электронной лавины найти необходимо, но затем необходимо связать его с механизмом разрушения самого вещества кристаллической решетки. Абстрактные поиски электронного тока в диэлектрике вообще, конечно, полезны, но далеко недостаточны для решения вопроса о пробое. Многие исследователи работают с ионными кристаллами или другими определенными группами диэлектрических материалов. Изучая их свойства, нужно искать путей образования материалов с высокой электрической прочностью.

При решении задачи об электрическом пробое необходима детализация процесса передачи энергии от электронов решетке кристалла. Без выяснения связи электрического тока с поведением структурных элементов решетки невозможно решать вопрос об электрическом пробое.

В докладе Г. И. Сканави описываются электрические свойства некоторых материалов. Возможно, что разрушение керамических материалов происходило не из-за нарушения самой аморфной фазы, а за счет образования трещинок, пор. А роль пор твердо установлена работами Завадовской, Гутина, Закгейма и др. В филиале АН СССР в г. Новосибирске исследованы прессованные образцы диэлектриков; при этом обнаружено закономерное изменение ряда характеристик (проводимости, постоянной решетки, диэлектрического коэффициента ϵ , $\tan \delta$) в связи с химическими свойствами и энергетическими характеристиками вещества. Одним из возможных направлений исследования является отыскание связи электрической прочности с физико-химическими свойствами диэлектриков. Эти связи необходимо изучать в полях высокой напряженности, т. е. близких к 10^6 в/см.

В. И. Оделевский высказывает сомнение в том, что при ионизационных процессах, развивающихся в NaCl, образуется атомарный хлор. По его мнению, ни атомарный хлор, ни атомарный натрий при ударной

ионизации не образуется. Процесс пробоя, несмотря на значительные токи, имеющиеся во 2-й стадии пробоя, не сопровождается электролизом. Возможно, что токи связаны с вхождением электронов из катода.

Р. Л. Мюллер говорит, что А. Ф. Иоффе, изучая электролиз NaCl, наблюдал прорастание дендрита от одного электрода к другому, и от образования этого металлического мостика трудно было избавиться: нужно было принимать специальные меры для предупреждения образования мостиков. Пробой должен сопровождаться выделением атомарных Na и Cl. Микроскопический анализ должен обнаружить в кристалле (в канале, где произошел пробой) металлический Na, а химический анализ должен обнаружить в окружающей среде наличие хлора.

Ю. А. Старикин говорит по вопросу о подвижности электронов в твердых диэлектриках следующее:

При изучении поведения электронов проводимости твердых диэлектриков в сильных электрических полях известный интерес представляет вопрос о зависимости подвижности электронов от напряженности внешнего электрического поля. Этот вопрос в литературе освещен слабо и касается главным образом неполярных кристаллов.

Однако сравнительно простым способом можно получить выражение для подвижности электронов, рассматривая поведение среднего электрона.

По определению подвижность электрона измеряется отношением скорости дрейфа u к напряженности внешнего электрического поля E , т. е.

$$b = \frac{u}{E}. \quad (1)$$

Скорость дрейфа можно выразить через скорость электрона v из соотношения:

$$\Delta p = m^* u = e E \tau = \frac{e E l}{v}, \quad (2)$$

где l — длина свободного пробега электрона.

Поэтому выражение (1) запишется

$$b = \frac{e l}{\sqrt{2 m^* \varepsilon}}, \quad (3)$$

где m^* — эффективная масса электрона.

ε — кинетическая энергия электрона.

В слабых полях энергия электрона будет порядка kT .

Поэтому подвижность электрона для слабых полей запишется

$$b = \frac{e l}{\sqrt{2 m^* k T}}. \quad (4)$$

В сильных электрических полях энергия электрона может сильно отличаться от средней тепловой энергии. Определим выражение для энергии электрона в сильных полях. Для этого учтем, что в стационарном состоянии потеря энергии электроном в результате взаимодействия с колебаниями решетки должна компенсироваться приобретением энергии за счет электрического поля.

Согласно квантовой теории взаимодействие электрона с колебаниями решетки можно рассматривать как процесс поглощения или испускания фононов.

Пусть N_q — среднее число фононов с энергией $\frac{h}{2\pi} \omega$, тогда вероятность поглощения фонона при одном акте взаимодействия будет пропорциональна N_q

$$W_a = a N_q,$$

а вероятность испускания фонона будет пропорциональна $N_q + 1$

$$W_e = a (N_q + 1).$$

Учитывая, что $W_e + W_a = 1$, получим следующие выражения:

1) вероятность поглощения фонона за единицу времени:

$$W_a = \frac{1}{\tau} \frac{N_q}{2N_q + 1};$$

2) вероятность испускания фонона за единицу времени:

$$W_e = \frac{1}{\tau} \frac{N_q + 1}{2N_q + 1}.$$

Поэтому потеря электроном энергии за единицу времени будет:

$$\Delta \phi \varepsilon = W_e \frac{h}{2\pi} \omega - W_a \frac{h}{2\pi} \omega = \frac{\frac{h}{2\pi}}{\tau (2N_q + 1)}.$$

Приобретенная электроном энергия за единицу времени численно равна работе, совершаемой полем:

$$\Delta \phi \varepsilon = e E u.$$

В стационарном состоянии имеем $\Delta \phi \varepsilon = \Delta_E \varepsilon$, т. е.

$$\frac{\frac{h}{2\pi} \omega}{\tau (2N_q + 1)} = e E u.$$

Подставляя, значение u из (2) и учитывая, что $\tau = \frac{l}{v}$, получим:

$$\varepsilon = \frac{(e E l)^2 (2N_q + 1)}{2h \omega}. \quad (5)$$

Рассмотрим по отдельности подвижность электрона в сильных полях для неполярного и ионного кристалла.

а) Кристалл с атомной решеткой.

Для неполярного кристалла основную роль во взаимодействии электрона с колебаниями решетки играют так называемые акустические колебания, для которых имеем:

$$\left(\frac{h}{2\pi} \omega \right)^2 = 2m v_s^2 \varepsilon,$$

где v_s — звуковая скорость.

Кроме того, всегда имеем $kT \gg \frac{h}{2\pi} \omega$ и, следовательно;

$$2N_q + 1 \approx \frac{2kT}{\frac{h}{2\pi} \omega}.$$

Тогда из соотношений (3) и (5) получим:

$$b = \frac{el}{\sqrt{2} m^* kT} \left(\frac{\sqrt{2} m v_s^2 kT}{eEl} \right)^{1/2} \quad (6)$$

б) Кристалл с ионной решеткой.

Для ионного кристалла основную роль во взаимодействии электрона с колебаниями решетки играют так называемые оптические колебания, для которых $\frac{h}{2\pi} \omega = \frac{h}{2\pi} \omega_o$.

Здесь возможны два случая:

1-й случай — средняя энергия электрона много меньше энергии фотона: $\varepsilon \ll \frac{h}{2\pi} \omega_o$. Этот случай возможен только для низких температур и слабых полей. Подвижность электрона определяется формулой (4).

2-й случай — энергия электрона много больше энергии фотона: $\varepsilon \gg \frac{h}{2\pi} \omega_o$.

Он возможен либо при низких температурах и сильном поле, либо при высоких температурах и любом поле.

Для сильного электрического поля будем иметь:

$$1) \quad \varepsilon \ll \frac{h}{2\pi} \omega_o \text{ и } kT \ll \frac{h}{2\pi} \omega_o.$$

При этих условиях $2N_q + 1 \approx 1$. Поэтому из (3) и (5) имеем:

$$b = \frac{\frac{h}{2\pi} \omega_o}{\sqrt{2} m h \omega_o} \cdot \frac{1}{E}, \quad (7)$$

$$2) \quad \varepsilon \gg \frac{h}{2\pi} \omega_o \text{ и } kT \gg \frac{h}{2\pi} \omega_o.$$

При этих условиях $2N_q + 1 \approx -\frac{2kT}{\frac{h}{2\pi} \omega_o}$. Поэтому из (3) и (5) имеем:

$$b = \frac{\frac{h}{2\pi} \omega_o}{\sqrt{2} m k T} \cdot \frac{1}{E}. \quad (8)$$

Таким образом, мы видим, что для неполярных кристаллов подвижность электрона в сильных полях обратно пропорциональна корню квадратному из напряженности поля, а для ионных кристаллов подвижность электрона обратно пропорциональна напряженности поля.

Кроме того, формулы (4), (6), (7) и (8) позволяют легко определить и температурную зависимость подвижности.

Г. И. Скана в и говорит:

Исследуя поликристаллические вещества, невозможно проверить какую-либо теорию электрического пробоя, так как теории пробоя имеют в виду диэлектрики правильной структуры, а структура поликристаллов и связи в них сложны. Нет смысла сопоставлять электрическую прочность поликристаллических диэлектриков и энергию решетки для этих материалов. Электрический пробой, электрическая прочность поликристалла не позволяют судить о прочности решетки кристалла и энергии решетки.

Очень интересна зависимость электрической прочности от температуры, но, к сожалению, все выступавшие не обсуждали вопроса о температурной зависимости $E_{пр}$.