ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ И ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ДИЭЛЕКТРИКАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Е. К. ЗАВАДОВСКАЯ

(Представлено научным семинаром по диэлектрикам ТПИ)

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. Такая передача может происходить как путем непосредственных столкновений электронов с узлами решетки, так и путем взаимодействия электронов с квантами акустических и оптических колебаний.

Очевидно, что процесс передачи энергии от электрона частицам решетки не может эффективно происходить при прямом их столкновении. Вследствие слишком большой разницы в массе электрона и иона последний будет получать мало энергии от электрона. Более эффективной будет передача энергии при взаимодействии с фононом. При сравнимой величине их масс электрон будет передавать колебаниям решетки значительную долю своей энергии. Когда энергия, передаваемая от электронного тока узлам решетки, становится сравнимой с энергией решетки, тогда наступает разрушение связей между узлами—пробой диэлектрика.

Процесс пробоя характеризуется усиленной передачей энергии от электронов узлам решетки и должен сопровождаться уменьшением скорости электронов. Уменьшение скорости движения электронов наступает при возрастающем электрическом поле, поэтому должна уменьшаться их подвижность. Фролих подсчитал энергию, накопленную электронами в электрическом поле. Он определил условия пробоя тем, что мощность, накопленная электроном, должна быть равна мощности, передаваемой электроном решетке. Мощность, получаемая решеткой, идет на усиление тепловых колебаний ее узлов. При этом энергия электронов должна быть равной энергии ионизации. Усиление тепловых колебаний приводит к разогреванию и проплавлению решетки. Так объясняет Фролих процесс электрического пробоя. Фролих считает установившейся такую точку зрения на процесс электрического пробоя, как проплавление кристаллической решетки.

Мы считаем возможным, что электрический пробой завершается механическим разрушением кристалла. Место пробоя представляет собой механическое разрушение.

Мы полагаем, что накопленная электронами в электрическом поле энергия передается решетке и затрачивается на разрушение связи между ее частицами. Передача энергии от электронов решетке происходит особенно усиленно тогда, когда энергия электронов будет порядка величины энергии связи между частицами решетки.

В этом случае можно написать условие пропорциональности между величиной энергии, накопленной электронами в электрическом поле, и энергией решетки.

Электрон накапливает энергию в электрическом поле напряженностью E на длине свободного пути l , равную

$$elE. \quad (1)$$

Мощность, накапливаемую электроном, можно записать

$$evE. \quad (2)$$

Энергию, передаваемую электроном решетке за время Δt (время пробоя), полагаем пропорциональной энергии решетки

$$\begin{aligned} evE\Delta t &= AU, \\ euE^2\Delta t &= AU, \end{aligned} \quad (3)$$

где U — энергия решетки, A — коэффициент пропорциональности.

Экспериментальные данные указывают, что для кристаллов щелочно-галогидных солей между пробивной напряженностью поля и энергией решетки имеется линейная зависимость [1]. Согласно формуле (3), линейная зависимость между пробивной напряженностью поля и энергией решетки получается при условии, если подвижность электронов изменяется обратно

пропорционально напряженности поля, т.е. $u \sim \frac{1}{E}$.

Такое уменьшение подвижности электронов с изменением напряженности поля (согласно условию $v = uE$) соответствует постоянной скорости электронов.

Можно сделать другое предположение, что электрон передает решетке энергию ΔW , которую он накапливает за время свободного пробега τ .

$$\Delta W = evE\tau = euE^2\tau = \frac{e^2E^2}{m} \tau^2. \quad (4)$$

Предположим, что вся энергия, накопленная электроном на длине свободного пути, передается частицам решетки и затрачивается на разрушение связи между ними. В этом случае также можно написать условие пропорциональности между величиной энергии, накопленной электроном в электрическом поле на длине свободного пробега, и энергией решетки

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

В соответствии с экспериментальной линейной зависимостью между электрической прочностью кристаллов щелочно-галогидных солей и энергией решетки согласно (5) время свободного пробега должно изменяться с напряженностью поля по закону

$$\tau \sim E^{-\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

А следовательно, и подвижность должна изменяться по тому же самому закону

$$u \sim E^{-\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Повидимому, в более слабых полях подвижность меняется по закону $u \sim E^{-\frac{1}{2}}$, когда электроны передают решетке или примесям энергию, накопленную за время свободного пробега. В более сильных полях элект-

троны передают решетке энергию, которую они накапливают за время, соответствующее нескольким длинам свободного пути. В таком случае в конце каждого свободного пробега электрон передает только часть своей энергии решетке и продолжает ее накапливать до тех пор, пока при взаимодействии с фононами не передает значительной части всей накопленной энергии решетке.

Можно сделать предположение, что в том случае, если диэлектрик содержит большее количество примесей, электроны, взаимодействуя с ними, передают свою энергию в конце свободного пробега. Электрическому пробоя такого диэлектрика будет предшествовать изменение подвижности электронов по закону $\mu \sim E^{-\frac{1}{2}}$ и соотношение (5) будет соответствовать механизму пробоя диэлектрика с примесями.

Электрон, накопивший энергию в электрическом поле, передает ее колебаниям решетки. Таким образом, увеличение энергии колебаний решетки также обуславливается электрическим полем. Усиление взаимодействия электрона с решеткой в сильных полях сопровождается уменьшением его кинетической энергии и скорости движения. Можно сказать, что электрическое поле, действующее на диэлектрик, с одной стороны, ускоряет электроны, а с другой, посредством усиления взаимодействия электрона с решеткой тормозит его движение. При некоторых условиях возможно установление равновесия и стационарного тока через диэлектрик.

Мы рассматривали здесь подвижность электронов при сносе их в электрическом поле.

Различают три типа подвижности электронов в диэлектриках и полупроводниках.

1. Подвижность при сносе (дрейфе) электронов в электрическом поле μ_E . Эта подвижность электронов отличается от истинной подвижности. При сносе в электрическом поле электроны испытывают временные задержки около различных центров улавливания электронов. Вследствие этого средняя скорость движения электронов в электрическом поле на участке наблюдения будет меньше средней скорости на пути свободного пробега.

2. Подвижность электронов в зоне проводимости или истинная микроскопическая подвижность μ_M .

3. Подвижность при сносе электронов в магнитном поле $\mu_H = R \cdot \delta$.

Расчеты показывают, что $\mu_M = \mu_H$.

В настоящее время нет еще установившейся точки зрения на зависимость подвижности электронов в кристаллической решетке от напряженности поля.

Некоторые авторы считают, что подвижность электронов в диэлектриках остается постоянной величиной, не зависящей от напряженности поля. Так, Я. И. Френкель [2] в своей последней статье, посвященной вопросу о предпробивном состоянии диэлектриков, полагает, что подвижность электронов в диэлектриках не изменяется с напряженностью поля.

Относительно характера зависимости подвижности электронов в полупроводниках при изменении напряженности поля существуют различные точки зрения. Так, например, Вайбель объяснял рост электропроводности в полупроводниках с увеличением напряженности поля ростом подвижности электронов.

А. Ф. Иоффе и А. В. Иоффе [3] исследовали влияние поля на электропроводность некоторых полупроводников и высказали точку зрения, что подвижность электронов не играет существенной роли в увеличении электропроводности полупроводников с ростом напряженности поля.

Но в своих опытах А. Ф. Иоффе и А. В. Иоффе ограничивались напряженностью поля до $5 \cdot 10^4$ в/см и показали, что в области ниже $5 \cdot 10^4$ в/см

увеличение электропроводности с полем происходит вследствие увеличения концентрации электронов. Эту же точку зрения в отношении подвижности электронов поддерживает Ф. Ф. Волькенштейн [4]. Он указывает в своей книге „Электропроводность полупроводников:“ „Опыты Иоффе совершенно исключают предположение, что рост проводимости обязан повышению подвижности. Также с теоретической точки зрения нет оснований ожидать, чтобы подвижность сколько-нибудь существенно увеличилась с полем“.

Известны теоретические исследования советских ученых, в которых рассматривается зависимость подвижности электронов от напряженности поля в полупроводниках. Такие исследования проводили Л. Ландау и А. Компанейц [5], В. И. Давыдов и И. М. Шмушкевич [6], Н. Л. Писаренко [7] и др.

Л. Ландау и А. Компанейц вычисляли энергию электронов при сильных электрических полях в полупроводниках с атомарной структурой, учитывая столкновения электронов с акустическими колебаниями решетки. В этом случае было получено, что подвижность электронов в полупроводниках с атомной решеткой уменьшается с увеличением напряженности поля по закону $\mu \sim E^{-\frac{1}{2}}$.

В. И. Давыдов и И. М. Шмушкевич для полупроводников с атомарной решеткой также получили уменьшение подвижности электронов с ростом напряженности поля по закону $\mu \sim E^{-\frac{1}{2}}$. Для полупроводников с ионной решеткой ими получено возрастание подвижности электронов в сильных электрических полях.

Н. Л. Писаренко исследовал движение электронов в полупроводниках с атомарной решеткой при большой напряженности электрического поля с учетом ионизации столкновением и прилипания. Он получил, что подвижность электронов уменьшается с ростом напряженности поля по закону $\mu \sim E^{-\frac{1}{2}}$.

Подвижность электронов в сильном поле может уменьшаться вследствие возрастания хаотической скорости и, следовательно, затруднения сноса электронов в электрическом поле.

Теоретическое исследование подвижности электронов в полупроводнике германии типа *n* проводил Шокли [8]. Он указал, что можно создать приближенную теорию подвижности электронов. Для этого следует принять за основу положение, что в сильных полях электрон передает решетке мощность, равную той, которую электрон приобретает в электрическом поле.

Передают кристаллической решетке энергию преимущественно те электроны, у которых энергия в несколько раз больше kT .

Передаваемая электронами кристаллической решетке мощность выражается формулой

$$P_A = \left(4 mc^2 \frac{v_1}{l} \right) \left[\left(\frac{v_1^2}{2v_T^2} \right) - 1 \right], \quad (8)$$

где $v_T^2 = \frac{2kT}{m}$; l — средняя длина свободного пути.

Мощность, приобретаемая электронами,

$$P_E = euE^2. \quad (9)$$

Из дальнейших расчетов Шокли находит выражение скорости электронов в кристаллической решетке

$$v = uE = \left(\frac{32}{3\pi} \right)^{\frac{1}{2}} (C_{HT} E)^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что подвижность электронов в германии n должна уменьшаться с ростом напряженности поля по закону $u \sim E^{-\frac{1}{2}}$ при сильных полях, при которых мощность, передаваемая электроном решетке, равна приобретаемой электроном мощности.

Представляет интерес теоретическое исследование подвижности электронов в твердых телах, проведенное Е. М. Конуэллом [9], так как он рассматривает подвижность электронов в сильных электрических полях. Конуэлл указывает, что формальную теорию проводимости можно применить и для сильных полей, полагая приближенно, что процессы, вызывающие рассеяние электронов, являются упругими. Это условие выполняется в кристаллической решетке для интервала температур и напряженности поля, в котором в основном происходят столкновения электронов с акустическими колебаниями решетки и примесями. Как показывают опыты, для германия это наблюдается до напряженности поля 4000 в/см при комнатной температуре. Это условие выполняется также для электронов в газе, пока столкновения электронов не вызывают ионизации.

Е. М. Конуэлл обозначает функцию распределения электронов в присутствии электрического поля $f(k, E)$, где k —вектор электронной волны, E —напряженность поля, и приближенно записывает функцию распределения в таком виде

$$f(k, E) = f_0(k, E) - f_1(k, E) \cos \Theta,$$

где Θ есть угол между волновым вектором „ k “ и направлением поля.

Первый член $f_0(k, E)$ представляет собой функцию распределения электронов при слабых полях или поле, равном нулю. Второй член $f_1(k, E) \cos \Theta$ показывает изменение функции распределения электронов, вызванное действием внешнего электрического поля. Функция f_1 много меньше функции f_0 .

В установившемся состоянии скорость изменения функции распределения электронов f , обусловленной полем, уравнивается скоростью изменения функции распределения электронов, вызванной столкновениями последних.

Далее, Е. М. Конуэлл указывает, что вероятность рассеяния электронов колебаниями решетки или ловушками (нарушениями правильности решетки или примесями) не зависит от напряженности электрического поля до полей порядка $6 \cdot 10^5$ в/см. Это замечание Е. М. Конуэлла говорит о том, что электроны могут накапливать энергию в полупроводниках при росте поля до столь высоких его значений. Е. М. Конуэлл для плотности тока в твердом теле получил выражение

$$j = \frac{e^2}{3m} En \left[\frac{1}{k^2} - \frac{d}{dk} (k^3 \tau) \right], \quad (12)$$

где n —число электронов в единице объема.

Отсюда следует, что подвижность электронов может быть записана в следующем виде:

$$u = \frac{e}{m} \left[\frac{1}{k^2} - \frac{d}{dk} (k^3 \tau) \right]. \quad (13)$$

Такое выражение подвижности электронов действительно в слабых полях в твердом теле. Также оно может быть справедливо для тех сильных полей, при которых рассеяние электронов упругое.

При сильных полях функция распределения электронов изменяется с полем, а следовательно, и вычисленная на основании ее подвижность электронов тоже должна зависеть от напряженности поля.

Полученная Е. М. Конуэллом формула для подвижности электронов в сильных полях аналогична известному выражению подвижности в полупроводниках при распределении электронов по функции Максвелла-Больцмана.

В работе Е. М. Конуэлла является существенным указание о том, что в сильных полях, когда функция распределения электронов изменяется с полем, должна изменяться и подвижность электронов с полем.

Кроме того, представляет интерес замечание о том, что в некоторой области напряженности поля (до полей $6 \cdot 10^5$ в/см) вероятность столкновения электронов с решеткой или примесями не возрастает с полем, и электроны получают возможность накапливать энергию.

Нами [10] было получено выражение для подвижности электронов в диэлектриках. Исследуя зависимость подвижности электронов от напряженности поля, мы получили уменьшение подвижности электронов с ростом поля. Полагаем, что подвижность электронов достигнет своего наименьшего значения при наиболее интенсивной передаче электронами энергии решетке. Из условия минимума подвижности электронов нами найдено выражение для определения электрической прочности диэлектриков в виде

$$E_{np} = \frac{\epsilon W}{ea}, \quad (14)$$

где ϵ —диэлектрическая проницаемость, W —энергия электрона, e —заряд электрона, a —постоянная решетки.

Подсчитанная по этой формуле величина электрической прочности кристаллов щелочно-галогидных солей является близкой к экспериментальным значениям пробивных напряженностей для этих диэлектриков.

Вытекающие из этой формулы зависимости электрической прочности от диэлектрической проницаемости, энергии остаточного излучения, если положить, что $W = h\nu$, а также от постоянной решетки хорошо подтверждаются экспериментальными данными.

Таким образом, полученная нами зависимость подвижности электронов от напряженности поля находится в согласии с экспериментальными данными. Уменьшение подвижности электронов с напряженностью поля представляется необходимым явлением, сопровождающим передачу энергии электронами решетке и последующим пробоем.

Таким образом, теоретические исследования подвижности электронов в полупроводниках показали, что подвижность электронов изменяется с напряженностью поля.

В полупроводниках с атомарной структурой подвижность электронов уменьшается с напряженностью поля. В полупроводниках с ионной структурой подвижность электронов может возрастать. Нами показано, что подвижность электронов в диэлектриках должна уменьшаться с напряженностью поля по закону $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$ и в более сильных полях по закону $\mu \sim \frac{1}{E}$. Затем, при напряженности поля, соответствующей пробивной, подвижность электронов достигает минимального значения. В этом случае электроны передают накопленную ими энергию решетке, достаточную для разрушения диэлектрика. Наступает пробой диэлектрика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев А. А. и Завадовская Е. К. К теории электрического пробоя твердых диэлектриков. ДАН LXXXI, 3, 375, 1951.
2. Френкель Я. И. О предпробойном состоянии диэлектриков. ЖЭТФ, 23, 6, 619, 1952.

3. Иоффе А. Ф. и Иоффе А. В. Полупроводники в сильных электрических полях. Влияние поля на электропроводность Cu_2O , Tl_2S , V_2O_5 , Se , Sb_2S_3 , MoS_2 , WO_3 . ЖЭТФ, 9,12, 1425, 1451, 1939.
4. Волькенштейн Ф. Ф. Электропроводность полупроводников. Гостехиздат, 1947.
5. Ландау Л. и Компанейц А. Об отклонениях полупроводников от закона Ома в сильных электрических полях. ЖЭТФ 5,3, 270, 1935.
6. Давыдов Б.И. и Шмушкевич И. М. Теория электронных полупроводников. УФН. XXIV, 21, 1940.
7. Писаренко Н. Л. Поведение полупроводников в сильных электрических полях. Изв. Акад. наук СССР, серия физ. 5—6, 631, 1938.
8. W. Shockly. Mobility of Electrons in High Electric Fields: Theory. Phys. Rev. 82, 2, 330, 1951.
9. E. M. Conwell. Mobility of Electrons in High Electric Fields. Phys. Rev. 88,6, 1379, 1952.
10. Воробьев А. А. и Завадовская Е. К. Определение величины электрической прочности диэлектриков из условия минимума подвижности электронов. Известия Томского политехнического института, 73,3, 1952.