

ДИСКУССИЯ ПО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОТЕРЯМ

А. А. Воробьев.—Данные К. А. Водопьянова представляют интерес, так как они позволяют провести параллель между диэлектрическими потерями и электрическим пробоем. Корреляция здесь далеко идущая и представляет интерес. Возрастание ε также укладывается в общие представления. По всей вероятности, здесь принимает участие основная структура, а не примеси и дополнительные ионы. Желательно, чтобы измерения эти были продолжены.

Термин структурные потери устарел, так как он затемняет физические процессы.

Что касается замораживания ионных зарядов, то в свое время мы этим занимались вместе с Вендеровичем. Удавалось замораживать заряд на длительное время и в простых структурах.

В. И. Оделевский.—1) О видах диэлектрических потерь. Впервые структурные потери были введены П. П. Кобеко. Сканава ввел это понятие для тех потерь, которые не зависят от температуры. Термин „структурные потери“ следует изъять, как не имеющий физического смысла.

2) Относительно доклада Н. П. Богородицкого. Нельзя согласиться с объединением релаксационных потерь, потерь проводимости и резонансных потерь, которое предлагает Богородицкий. Потери разделяются на потери проводимости, релаксационные (дипольные) и резонансные.

3) По докладу Р. Л. Мюллера. Р. Л. Мюллер при расчете энергии активизации учитывает только кулоновские силы, но не учитывает силы отталкивания и поляризационные.

В. Н. Кессених.—На данном совещании изложен очень большой и разносторонний материал.

Бесспорно установлено, что действительно объективно существует группа потерь проводимости; это подтвердила классическая зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры и частоты, полученная Ворожцовым для плавленого кварца. Поэтому нет оснований для причислений потерь проводимости к релаксационным потерям и нет оснований для устранения термина релаксационных потерь.

Релаксационные колебания имеют место во всех радиосхемах—это переходные процессы, простая экспоненциальная зависимость от времени. Поэтому Богородицкий имел некоторые основания отнести потери проводимости к релаксационным. Согласен со Сканава, что следует различать релаксацию дипольную, связанную с вращением, и релаксацию более сложную (работы Водопьянова и его учеников).

Структурные потери—неуязвимы; этот термин промежуточный; туда относилось все непонятное. Этим термином нецелесообразно пользоваться.

Существование типа потерь, не зависящих от частоты, экспериментально показано в работах Водопьянова.

Можно ли построить модель, воспроизводящую в большом диапазоне частот независимость от частоты? Такую систему невозможно построить в виде чисто электрической схемы, состоящей из емкости, индуктивности и сопротивления, при наличии реактивной составляющей. Но, применяя модель колебательную с флюктуационными процессами, можно бы объяснить эту независимость.

В замечаниях, сделанных т. Мационашвили, неясно, можно ли, во-первых, утверждать, что слабовыраженные максимумы реально существуют. Не происходит ли здесь образование объемных зарядов за счет геометрии образца? Не могли ли здесь сказаться и некоторые особенности работы Q -метра? Бывали случаи, когда при измерениях на высоких частотах в образце с нанесенным катодным распылением серебряным электродом наблюдалось кажущееся изменение ϵ почти в 2 раза. Причиной этого явления оказывалось выключение внешней части электродов вследствие скинэффекта.

Г. И. Скана ви. — Доклад В. И. Оделевского очень интересный. В нем вопросы диэлектрических потерь в стеклах затронуты по существу. Показано, что в ряде случаев можно получить максимумы $\text{tg } \delta$ там, где до сих пор их не получали.

Попытка рассмотреть модель молекулярной структуры стекла представляет интерес. Но этот метод подсчета далеко не совершенен, хотя и дает оценочные величины.

Модель Оделевского развивает вопрос детальнее, позволяет сделать некоторые физические выводы, хотя не дает возможности подсчитать величины. Факт роста электропроводности, который рассмотрен Мюллером, очень интересен, но эта модель не дает возможности сделать количественные расчеты.

Замечания по докладу К. А. Водопьянова можно свести к следующему: было бы очень хорошо, если бы потери так просто определялись энергией решетки. Но пока трудно представить простую связь между энергией решетки и $\text{tg } \delta$. Зависимость $\text{tg } \delta$ от энергии решетки не дает еще возможности ни рассчитать, ни представить физические процессы, которые имеют место, и поэтому связь между $\text{tg } \delta$ и энергией решетки ничего не дает в практическом отношении. При измерении $\text{tg } \delta$ кристаллов особую роль играет тщательность измерений, чистота образца, условия измерения. Но экспериментально всегда легче определить $\text{tg } \delta$ и электрическую прочность $E_{пр}$, чем энергию решетки для сложных кристаллов. Как установить, что при измерениях были действительно учтены все те предосторожности, о которых говорил Мационашвили? Относительно температурных кривых встает вопрос, имеются ли потери, которые не зависят от температуры? В большом температурном интервале, как установили, потери не зависят от температуры. Теории для таких потерь нет. То же самое и относительно зависимости от частоты.

То, что сказал Водопьянов относительно релаксационных потерь, неясно. Если $\lambda \approx$ длине волны инфракрасных лучей, то получают релаксационные потери. Если же поле меняется с частотой 10^8 сек^{-1} , то должно быть запаздывание поляризации.

А. А. Воробьев — Г. И. Скана ви высказал мысль, что нет теории диэлектрических потерь, не зависящих от температуры, которые обнаружены Водопьяновым. Эти потери обусловлены колебаниями самой решетки. Что касается ошибок за счет влаги, то это влияние было бы заметно, — $\text{tg } \delta$ уменьшился бы с температурой. Так как этого нет, то и говорить о влия-

нии влаги не приходится. Результаты получены на одной установке в одних условиях. Что касается физики процесса, то ее здесь не меньше, чем в теории релаксационных процессов. Качественно явление предсказано, и большего требовать от теории нельзя. Физика здесь в том, что по мере уменьшения связи между частицами увеличиваются потери. Теория релаксационных потерь имеет очень мало физики. В настоящее время имеется достаточно данных для того, чтобы развивать более подробную молекулярную теорию.

С. Ф. Рябошенко—говорит, что он измерял $\operatorname{tg} \delta$ для NaCl, используя ртутные электроды (в то время как Брекенридж измерения проводил с серебряными электродами), и получил без температурной обработки кривую с максимумами такими же, как и Брекенридж. Если образец прогреть при температуре 150° (3—4 часа) и нагретый образец подвергнуть испытаниям под струей горячего воздуха, то максимумы не наблюдаются, только иногда появляется второй максимум $\operatorname{tg} \delta$ при $110\text{—}120^\circ\text{C}$. Тот же эффект можно получить и при графитовых электродах. Энергия активации определяется из

$$\operatorname{tg} \delta = C e^{\pm \frac{U_1}{kT}} \quad \text{и} \quad f_{\text{макс.}} = a e^{-\frac{U_2}{kT}}.$$

Которая же из энергий является энергией активации?

Измерения дают: $\frac{U_1}{U_2} = 3$ для Ca; 3 для Sr; 2 для Mg.

Р. И. Мюллер.—В моем расчете не приняты во внимание силы отталкивания. Было допущено, что эти силы исключаются при получении разности энергий в потенциальной яме и на потенциальном барьере. Повидимому, В. И. Оделевский прав в своем утверждении. Но я в опубликованной статье отметил, что расчет не претендует на строгость. Вместе с тем, мне кажется, что и расчет Оделевского не является строгим. Следует отметить, что мы с Оделевским мыслим в одном направлении, и расхождение заключается в том, что Оделевский исходит из кристаллохимических ионных представлений Гольдшмидта-Захариасена, а я основываюсь на своей ионно-атомно-валентной концепции.

В. И. Оделевский.—1) За счет наличия набора релаксаторов максимум $\operatorname{tg} \delta$ размывается, и вычисление U (энергии активации) затруднено. Поэтому более точным является расчет энергии по смещению максимума.

2) Почему $\operatorname{tg} \delta$ и E_{np} должны обязательно прямо зависеть от энергии решетки? Разумнее считать, что влияние энергии решетки не прямое, а косвенное. Правильнее было бы найти те промежуточные связи, которые определяют связь между $\operatorname{tg} \delta$, E_{np} и энергией решетки. По данным Водопьянова, диэлектрические потери обусловлены релаксацией. Но релаксационный процесс обязательно связан с наличием дефектов и связь с энергией решетки обязательно косвенная.

3) Замечания о выращивании кристаллов.—Кристаллы, выращенные из расплава, имеют электропроводность в 10—100 раз большую, чем выращенные из раствора. Это обусловлено „заглатыванием“ дырки. Интересно исследовать кристаллы, выращенные из раствора.

Т. Н. Вербицкая.—Появление независимости $\operatorname{tg} \delta$ от температуры непонятно. Может быть К. А. Водопьянов даст объяснение этому явлению. О неточности измерения нет основания говорить. Интересно знать, не измерялись ли потери в области отрицательных температур и не наблюдается ли повышения $\operatorname{tg} \delta$ с понижением температуры.

Г. И. Скана ви. — При отсутствии максимума $\operatorname{tg} \delta$ можно вычислять энергию активации и по росту кривой $\operatorname{tg} \delta$ от температуры.

Нужно учитывать набор времен релаксации, это имеет большое значение.

В моем докладе имеется более точный расчет величины U (энергии активации). Что касается независимости $\operatorname{tg} \delta$ от температуры, то здесь нужны не гадания, а подробное изучение. В докладе я хотел показать на примере SrBiTiO_2 , что, исходя из релаксационного механизма, мы предсказали и получили то, что предсказали, т. е. молекулярная теория релаксационных потерь может не только объяснять, но предсказывать.

Быть может, что рост потерь при прогреве определяется свойствами кристалла, а уменьшение угла потерь происходит за счет испарения влаги.

К. А. Водопьянов. — В литературе нет данных абсолютного значения $\operatorname{tg} \delta$ для простых щелочно-галлоидных кристаллов. Хиппель в последней своей работе указывает, что $\operatorname{tg} \delta$ у простых кристаллов меньше, чем $2 \cdot 10^{-4}$.

Мы производили измерения $\operatorname{tg} \delta$ порядка 10^{-5} более точным методом, разработанным в нашей лаборатории, и имеем возможность связать $\operatorname{tg} \delta$ с физико-химическими свойствами кристалла. Мы показали, что $\operatorname{tg} \delta$ кристалла зависит от энергии кристаллической решетки.

Измеряя температурный ход (прямой и обратный) $\operatorname{tg} \delta$, мы не обнаружили максимумов у неотожженных образцов кристалла. Эти максимумы получаются только для отожженных кристаллов.

По нашим экспериментальным данным получается, что диэлектрические потери в простых кристаллах обусловлены слабосвязанными ионами, которые в зависимости от внешних условий (частоты и температуры) могут давать потери омического и релаксационного характера.

Есть основание считать, что чем меньше энергия кристаллической решетки, тем больше число слабосвязанных ионов, поэтому и получается вполне разумная связь между $\operatorname{tg} \delta$ и энергией решетки. Наличие этой связи дает возможность судить о качестве технических диэлектриков как при их эксплуатации, так и изготовлении.
