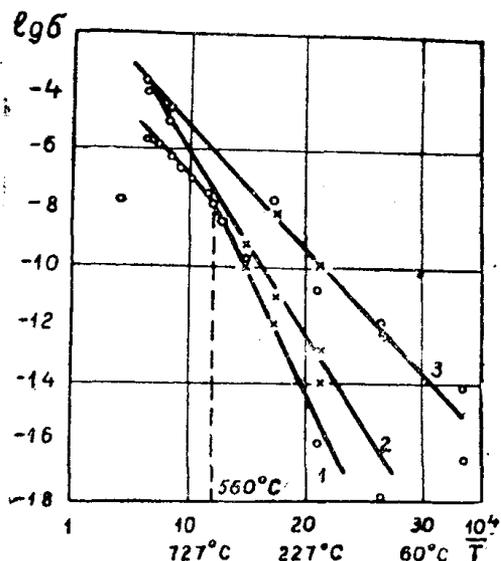


пературы по данным Сосмана [3 стр. 145], Н. П. Богородицкого и В. Н. Малышева [7].

Из фигуры видно, что плавленный кварц (кривая 1) по своим изолирующим свойствам превосходит кристаллический (кривые 2 и 3) который имеет репутацию превосходного изолятора.



Фиг. 1. Зависимость электропроводности плавного и кристаллического кварца от температуры.

1. Плавный кварц.
 2. Кристаллический кварц, электрическое поле направлено перпендикулярно оптической оси.
 3. Кристаллический кварц, электрическое поле направлено вдоль оптической оси.
- o — данные Сосмана, x — данные Богородицкого и Малышева.

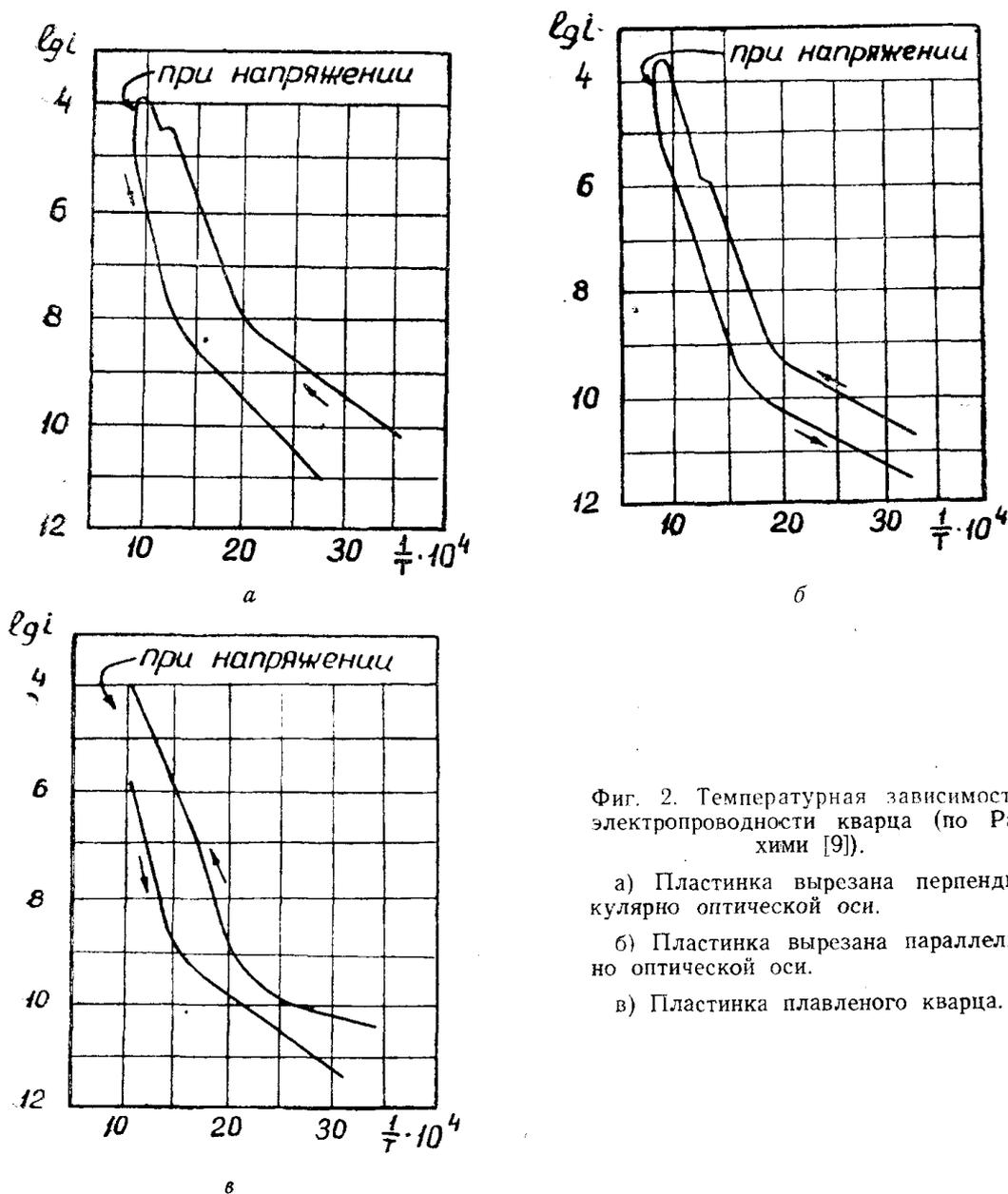
Кроме того, из фигуры выясняется зависимость электропроводности кристаллического кварца от кристаллографического направления. Электропроводность вдоль оптической оси (кривая 3) в сотни раз превосходит таковую в поперечном направлении (кривая 2). Последний факт уже давно привлекал внимание исследователей [8, 9, 10], которые считают, что повышенная проводимость кристаллического кварца вдоль оптической оси обусловлена своеобразными каналами, образованными расположенными по спирали кремний-кислородными тетраэдрами.

Разница в величине проводимости кристаллического и плавного кварца, вероятно, обусловлена тем, что при расплавлении кристаллического кварца часть примесных ионов, закрепленных главным образом в его „каналах“ слабыми поляризационными силами, внедряется в разрывы кремний-кислородного каркаса, где связывается сильными валентными связями. Это приводит к увеличению энергии активации носителей тока, что сказывается на уменьшении величины электропроводности и увеличении наклона кривой $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ (фиг. 1).

Излом на кривой $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ для плавного кварца (кривая 1) связан с полиморфными превращениями кварца. Действительно, из ряда исследований [2], [9], [11], [12] следует, что электропроводность кристаллического кварца претерпевает в точке превращения $\alpha \rightarrow \beta$ модификаций кварца резкое изменение. Так по Рахими [9], в образце, вырезанном перпендикулярно оптической оси кристалла (фиг. 2а), в точке превращения ($T = 573^\circ\text{C}$) происходит либо резкое понижение проводимости, с последующим слабым возрастанием с температурой, либо остановка. В образце, вырезанном параллельно оптической оси (фиг. 2 б), в окрестностях точки превращения наблюдается нечто вроде порога, затем проводимость растет в соответствии с предыдущим законом. Плавный кварц не имеет порога (фиг. 2 в), но в окрест-

ностях точки превращения уменьшает наклон кривой $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

Это представлено и на фиг. 1¹). Однако недавние измерения В. П. Прянишникова и Н. А. Коноваловой [2] показывают, что и для плав-



Фиг. 2. Температурная зависимость электропроводности кварца (по Рахими [9]).

а) Пластика вырезана перпендикулярно оптической оси.

б) Пластика вырезана параллельно оптической оси.

в) Пластика плавленного кварца.

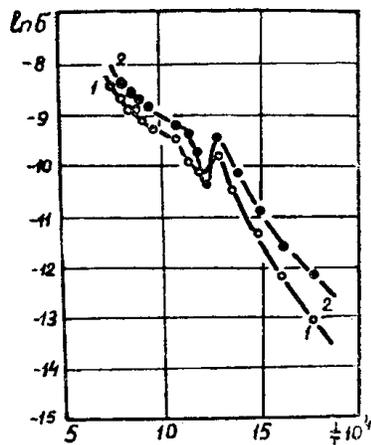
ленного кварца на кривой $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ в окрестности 573°C иногда

вместо простого излома наблюдается резкое уменьшение проводимости, подобное понижению электропроводности кристаллического кварца, полученному Рахими (фиг. 3 и фиг. 2 а).

Трактуя изменение электропроводности при температуре 573°C превращением $\alpha \rightleftharpoons \beta$ модификаций кварца, можно ожидать таких же эффектов и в точках превращений других модификаций кремнезема. Однако

¹) Как показали наши исследования, в зависимости $\ln \text{tg } \delta = f\left(\frac{1}{T}\right)$ при 573°C также наблюдается аналогичный излом кривой.

результатов, указывающих на изменение характера температурной зависимости электропроводности плавленного кварца в области полиморфных превращений тридимита (117, 163°C) и кристобалита (200—275°C), нет. Вероятно, в этом случае сказывается стабильность (по Р.Л. Мюллеру [13]) связи Si—O, исключающей возможность структурных превращений.



Фиг. 3. Зависимость электропроводности плавленного кварца от температуры вблизи точки полиморфного превращения (по Коноваловой и Прянишникову [2]).

1. Для прозрачного плавленного кварца.
2. Для непрозрачного.

Поверхностная электропроводность плавленного кварца

Опыты Картисса [1] показали, что поверхностная проводимость предварительно очищенного хромовой смесью образца плавленного кварца мала ($10^{16} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$) вплоть до 100% относительной влажности воздуха. При этом поверхностная электропроводность неочищенного образца растет с изменением влажности окружающего воздуха, увеличиваясь на несколько порядков (с $10^{-16} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ до $10^{-8} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$) при повышении относительной влажности воздуха до 90%. Более поздние опыты Н. Чиркова [14] свидетельствуют о том же: поверхностная электропроводность плавленного кварца обязана присутствию на поверхности образца ионообразующих веществ и растворителя в виде адсорбированного полимолекулярного слоя.

Наличие капилляров, как показал Гнанан [15], незначительно понижает электропроводность плавленного кварца, что свидетельствует о малом количестве примеси, содержащейся в капиллярах.

Механизм электропроводности

Вопрос о механизме электропроводности кварца уже давно интересовал исследователей. Работы русских ученых А. Ф. Иоффе [16] и А. А. Шапошникова [17] привели к выводу, что электропроводность кварца обусловлена в основном ионами примеси. Возможность движения ионов в кварце была доказана опытами Варбурга и позднее Фогеля и Гибсона [18], которые пропускали сквозь кристаллы кварца ионы натрия и лития в количествах, вполне соответствующих закону Фарадея.

Сильная зависимость электропроводности кварца от температуры, даже при низких температурах, также указывает на ионный характер ее.

Обратимся снова к фиг. 2. Из фигуры видно, что в области температур 200—300°C температурная зависимость электропроводности претерпевает излом. Рахими [9] объясняет этот излом тем, что ниже точки излома проводимость смешанная, выше—ионная. П. Е. Саржевский [19], изучавший природу добавочной проводимости кварца в сильных полях, тоже получил подобный излом кривой $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$

в том же температурном интервале. Изучая гальваномагнитные эффекты, обнаружение которых является прямым доказательством электронной (дырочной) проводимости диэлектрика, он нашел, что эти эффекты наблюдаются лишь при температуре ниже 300°C . Можно перечислить еще ряд работ, также свидетельствующих о том, что до $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ проводимость кварца смешанная, выше—ионная (причем движутся катионы [16], [10]), которая совершенно затемняет электронную. Следует здесь отметить, что Р. Л. Мюллер в своей теории электропроводности твердых ионно-атомновалентных веществ [13] считает излом кривой $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ при $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ обусловленным не изменением носителей тока, а результатом уменьшения энергии активации за счет изменения энтропии при переходе от стабильного состояния к лабильному (критическая температура для Si--O лежит в области $150\text{--}300^{\circ}\text{C}$). Итак, по Р. Л. Мюллеру, механизм проводимости кварца должен быть одинаковым (смешанная электропроводность) во всем температурном интервале, только при высокой температуре начинается влияние энтропии, которое ведет к изменению наклона кривой $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

2. Диэлектрические потери и диэлектрическая проницаемость

Первоначальные исследования, например работа Н. П. Богородицкого и В. Н. Малышева [7], привели к выводу, что диэлектрические потери в плавленом кварце являются чисто омическими. Свой вывод авторы сделали на основании следующих фактов: диэлектрические потери, измеренные при технической частоте (измерения проводились от 20 до 400°C), и потери, рассчитанные по проводимости, отличаются лишь в два раза. При высоких частотах вследствие малой чувствительности установки авторы не смогли измерить $\text{tg } \delta$. Считая, что несовпадение рассчитанных и измеренных значений угла диэлектрических потерь обусловлено неточностью опыта и отмечая ничтожную величину $\text{tg } \delta$ при высоких частотах, авторы делают заключение об омической природе диэлектрических потерь в плавленом кварце.

Последующие опыты, проведенные многими авторами, показали, что при невысоких температурах (от 0 до 400°C) и в диапазоне высоких частот угол диэлектрических потерь плавленого кварца очень мал и в пределах ошибок измерения не зависит от температуры и частоты [20], [21], [22], [23], [30], (таблица 1)¹.

При более высоких температурах (от 400 до 1200°C), в том же частотном диапазоне ($5\text{--}50$ *мгц*), угол диэлектрических потерь плавленого кварца, как показали наши исследования [28], [31], начинает резко возрастать, проявляя закономерности, характеризующие омический тип потерь: значения угла диэлектрических потерь обратно пропорциональны частоте и экспоненциально зависят от температуры. Кроме того, об омическом характере высокотемпературных диэлектрических потерь свидетельствует совпадение измеренных значений угла диэлектрических потерь с вычисленными по проводимости и совершенно одинаковый нагрев образца при приложении к нему как постоянного, так и равного ему высокочастотного напряжения (таблица 2).

¹) Вообще, как указывают Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридберг [29], абсолютной независимости угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков от температуры и частоты не должно быть.

Таблица 1

Значение угла диэлектрических потерь плавленого кварца при комнатной температуре по данным разных авторов

Автор	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$	Частота в гц	Метод измерения
Н. П. Богородицкий [7]	< 3	$2 \cdot 10^6$	Метод замещения
К. А. Водопьянов [22]	1,7	10^6	Метод изменения сопротивления
	1,3	10^7	
	1,4	10^8	
Иностранные обзорные данные [24]	1,7	$(3-100) \cdot 10^6$	Метод полых резонаторов
Воркс и др. [25]	1,0	$(50-1000) \cdot 10^6$	
Рэйс и Леонард [26]	2	$(0,5-1,5) \cdot 10^6$	Калориметрический
П. П. Кобеко и др. [27]	1,4	10^6	Метод замещения
Б. И. Ворожцов [28]	1,0	$(5-50) \cdot 10^6$	Калориметрический

Таблица 2

Нагрев образца плавленого кварца при приложении к нему постоянного и переменного напряжения (500 вольт в течение 30 сек) в зависимости от температуры

Температура в $^{\circ}\text{C}$	Нагрев при постоянном напряжении в $^{\circ}\text{C}$	Нагрев при $f = 18,5 \text{ мгц}$ в $^{\circ}\text{C}$.
535	3,6; 3,5; 3,6	3,4; 3,5; 3,5
650	17,2; 17,5; 17,5	18,5; 18,0; 18,1
740	37,5; 39,0; 38,5	36,5; 37,0; 37,2

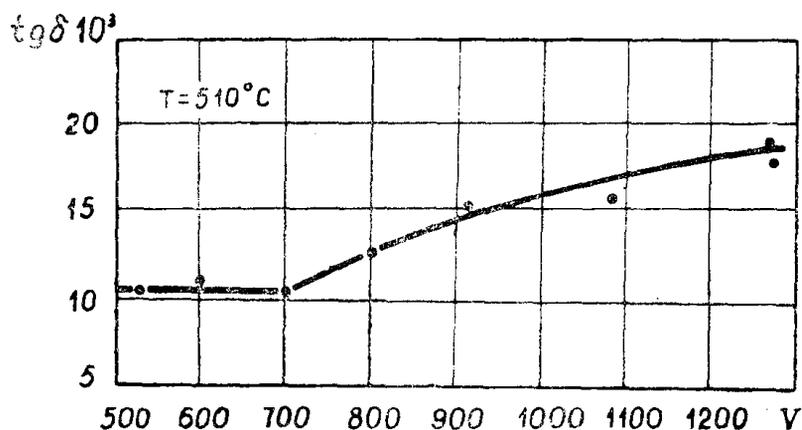
Изучение диэлектрических потерь в стеклах при очень низких температурах [32, 33] выявило так называемый деформационный тип диэлектрических потерь, который обусловлен качательным движением целых частей структурной решетки, вследствие наличия в ней разного рода дефектов. Как показала В. А. Иоффе [33], этот механизм потерь приводит к появлению в различных силикатных стеклах максимума угла диэлектрических потерь, который при частоте 10^6 гц лежит в области $40-60^{\circ}\text{K}$. С повышением частоты максимум сдвигается в сторону высоких температур, что указывает на релаксационный характер диэлектрических потерь. Низкое значение энергии активации ($0,5-1 \text{ ккал/моль}$) объясняет отсутствие максимума в области более высоких температур.

Измерение угла диэлектрических потерь в кристаллическом кварце также приводит к выявлению низкотемпературного максимума $\operatorname{tg} \delta$, вернее нескольких максимумов [34], обусловленных различными типами дефектов структуры. В этой же работе имеется ссылка на то, что и плавленый кварц обладает этими эффектами: у него обнаружено наличие трех низкотемпературных максимумов, связанных с такими дефектами, как присутствие ионов железа, недостаток кислорода и т. п.

Итак, в температурной зависимости угла диэлектрических потерь плавленого кварца отчетливо выражены три области: низкотемпературные максимумы, слабо зависящая от температуры средняя часть и резкое возрастание при высоких температурах.

Относительно механизма, обуславливающего малую зависимость угла диэлектрических потерь при средних температурах, определенного мнения еще не сложилось. Может быть, этот эффект обусловлен простым наложением постепенно уменьшающихся деформационных потерь и растущих омических.

При повышенных напряженностях электрического поля диэлектрические потери в плавленом кварце начинают зависеть от него. При этом обязательным является наличие в образце газовых включений. На фиг. 4 представлена эта зависимость [28]. Характер температурной



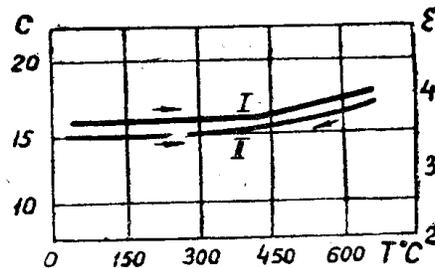
Фиг. 4. Зависимость угла диэлектрических потерь плавленого кварца, содержащего газовые включения, от напряжения (толщина образца равна 3 мм.)

зависимости угла диэлектрических потерь также изменяется при некоторой температуре, определяющейся количеством и размером газовых включений, частотой и величиной напряженности электрического поля: угол диэлектрических потерь плавленого кварца начинает расти более резко, чем при потерях проводимости. Эти дополнительные потери происходят за счет ионизации газовых включений и могут, таким образом, служить причиной резкого разогрева кварцевых изоляторов в высокочастотных полях повышенной напряженности. Например, по нашим наблюдениям, образцы, содержащие газовые включения, можно было нагреть до температуры белого каления за несколько секунд (при $E = 3$ кв/см).

Согласно данным ряда авторов [1], [9], [27], [35] диэлектрическая проницаемость плавленого кварца равна $3,5 \div 4,1$. Разница в значениях заключается, по-видимому, в различии образцов. Особенно большие колебания в величине диэлектрической проницаемости наблюдаются у непрозрачного кварца. Как указывают П. П. Кобеко, А. В. Коровник и др. [27], эти колебания вызваны поглощением влаги, повышающей значение ϵ , и наличием воздушных пузырьков, снижающих его.

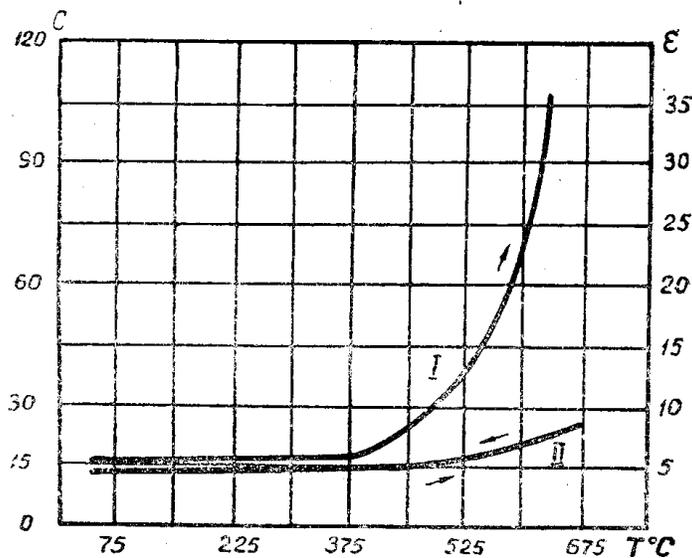
Интересна зависимость диэлектрической проницаемости плавленого кварца от частоты и температуры. Измерения Егера [1, стр. 109] показывают, что от 250 до $3 \cdot 10^7$ гц ϵ практически не зависит от частоты. От температуры диэлектрическая проницаемость плавленого кварца также зависит очень слабо. Так, П. П. Кобеко [27] и Н. П. Богородицкий [36] нашли, что до 400°C ϵ плавленого кварца изме-

няется только в третьем знаке. При достижении более высоких температур диэлектрическая проницаемость начинает расти. Однако этот рост весьма мал, если сравнить с ростом ϵ кристаллического кварца (пластинка вырезана перпендикулярно оптической оси) или стекла. Согласно Рахими [9] и М. С. Чмутину [37], диэлектрическая проницаемость кристаллического кварца, начиная с 350°C , резко возрастает, достигая при 600°C значения 20—30 (фиг. 5 и 6). Такое отличие обуслов-



Фиг. 5. Зависимость ϵ плавленного кварца от температуры (по Рахими [9])
1 — до электроочистки, 2 — после электроочистки.

лено, по-видимому, большей энергией закрепления примесных ионов в плавленном кварце, что приводит к более слабому влиянию ориентирующего действия электрического поля на тепловое движение ионов.



Фиг. 6. Зависимость ϵ кристаллического кварца от температуры
1 — до электроочистки, 2 — после электроочистки.

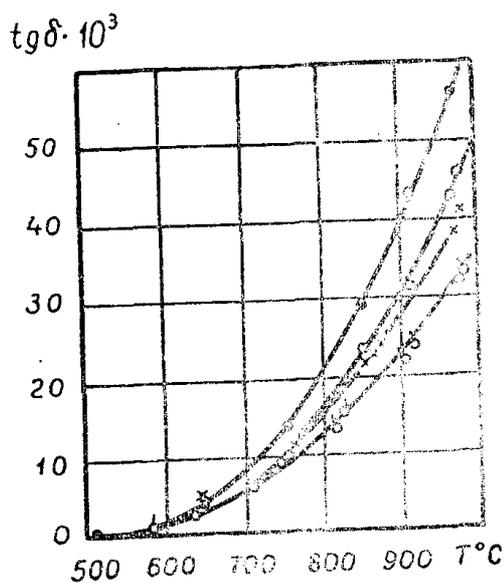
3. Влияние истории образца плавленного кварца на его электрические свойства

В этом разделе мы рассмотрим только влияние на электрические свойства плавленного кварца предварительной термической обработки и электроочистки.

Факт улучшения электрических свойств диэлектрика, в частности уменьшения электропроводности, после пропускания через нагретый до высокой температуры образец постоянного электрического тока был известен уже давно [38], [16], [39], [9].

Тщательное изучение этого явления позволило А. Ф. Иоффе еще в 1915 г. [16] сделать следующие выводы: 1) необратимое уменьшение проводимости после пропускания через образец тока (электроочистка) должно наблюдаться при высоких температурах, когда число ионов, участвующих в прохождении тока, становится сравнимым с общим количеством вещества, способного диссоциироваться; 2) при более низких температурах уменьшение электропроводности при пропускании тока через образец все больше становится результатом нарастания обратной э. д. с. поляризации.

Рахими [9] подтвердил этот вывод, показав (фиг. 2), что после электроочистки при 700°C электропроводность кристаллического и плавленного кварца уменьшалась примерно на один порядок.



Фиг. 7. Температурная зависимость угла диэлектрических потерь плавленного кварца, подвергнутого различным предварительным обработкам. ● — до обработки ○ — после электроочистки, х — после дальнейшего прогрева при 500°C в течение 10 часов, ♂ — после дополнительной термообработки при 1200°C в течение 3 часов.

Наше исследование показывает, что и высокотемпературные диэлектрические потери в плавленном кварце проявляют аналогичное снижение [28]. Однако следует заметить, что влияние термической обработки на электрические характеристики плавленного кварца, согласно нашим исследованиям, начинает сказываться лишь с 1000–1100°C, причем процесс, уменьшающий диэлектрические потери, за 2–3 часа почти полностью завершается.

Как видно, наши данные не совпадают с результатами предыдущих исследователей и требуют иного подхода к объяснению этого эффекта. Если Кюри объяснял факт понижения электропроводности после прогрева обезгаживанием образцов, которое тем больше, чем больше температура и продолжительность термообработки, то наши исследования этому противоречат по следующим причинам: 1) вели-

Он же показал, что электроочистка сказывается и на величине диэлектрической проницаемости, которая, как это можно видеть из фиг. 5 и 6, также уменьшается.

Нами было показано [28], что и угол диэлектрических потерь плавленного кварца, измеренный при повышенных температурах, не остается инертным по отношению к электроочистке (фиг. 7) — он также снижается.

Ряд исследователей обнаружил, что предварительная термическая обработка кварца также улучшает его электрические характеристики. Кюри [8], исследовавший зависимость величины электропроводности кварца от предварительного нагрева, показал, что с ростом температуры и времени прогрева (от 500 до 1500°C) величина проводимости становится все меньше и меньше. Рахими также отмечает снижение величины электропроводности кварца после выдержки его с электродами при 700–800°C.

Наше исследование показывает,

чина сниженного в результате термообработки угла диэлектрических потерь не зависит от температуры и продолжительности термообработки (это справедливо для $T > 1000^\circ\text{C}$ и $t > 3$ часов), 2) вторичная термообработка не вызывает дальнейшего изменения угла диэлектрических потерь, и 3) термообработка в вакууме, которая бы облегчила обезгаживание, дает такое же уменьшение угла диэлектрических потерь, как и при атмосферном давлении.

Мы предположили, что эффект термообработки объясняется закреплением ионов примеси путем комплексообразования, а также термоэмиссией их из образца.

Изучение совместного влияния термообработки и электроочистки показывает, что термообработка и электроочистка действуют, по-видимому, на одни и те же носители тока, ибо, во-первых, электроочистка после термообработки не изменяет заметным образом величину угла диэлектрических потерь, во-вторых, термообработка после электроочистки дополнительно снижает величину угла диэлектрических потерь до уровня, обусловленного одной только термообработкой.

Заключение

Рассмотрев электрические характеристики плавного кварца, их изменение в зависимости от температуры, частоты и напряженности электрического поля, можно резюмировать: плавный кварц является одним из немногих электроизоляционных материалов, имеющих весьма высокие электрические свойства ($\sigma = 10^{-18} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, $\text{tg } \delta = 10^{-4}$), которые сохраняются в широкой области температур. При очень высоких температурах ($\sim 1000^\circ\text{C}$) электрические свойства плавного кварца остаются еще достаточно хорошими ($\sigma = 10^{-6} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, $\text{tg } \delta = 10^{-2}$ при $f = 25 \text{ мГц}$).

Нежелательным является наличие в плавном кварце даже немногочисленных пузырьков газа, служащих причиной появления при повышенных напряженностях электрического поля высокой частоты, ионизационных потерь, значительно повышающих разогрев изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глаголев С. П. Кварцевое стекло. ОНТИ, 1934.
2. Прянишников В. П. Кварцевое стекло. М., 1956.
3. Шишаков Н. А. Вопросы структуры силикатных стекол. М., 1954.
4. Тареев Б. М. Плавный кварц, *Электричество* № 6, 47, 1934.
5. Pulpan P. Плавный кварц *Ceskosl. sklara keramik*, 3, № 3, 1953.
6. Wright F. E. Плавный кварц—многосторонний индустриальный материал, *Mater. and Methods*, 37, № 2, 98, 1953.
7. Богородицкий Н. и Малышев В. Диэлектрические потери в кристаллах *ЖТФ*, 4, 7, 1306—1317, 1934.
8. Curie J. Исследование электропроводности кристаллических тел. *Ann. d chimie et d. phys.* 17, 203, 1889.
9. Rahimi N. G. Добавление к изучению электропроводности и диэлектрической постоянной кварца и некоторых других кристаллов. *Journ. Phys. Rad.* № 7, 291, 1938.
10. Ченцова Л. Г. и Веденеева Н. Е. Состояние примесей, внедренных в решетку плавного кварца. *ДАН СССР*, т. 68, № 2, 273, 1949.
11. Shimizu S. Предварительное сообщение об аномальной зависимости электропроводности кварца от температуры *Philos. Mag.* 13, № 87, 907, 1932.
12. Saegusa N. and Matsumoto T. Об аномальных изменениях с температурой электропроводности некоторых силикатных минералов и кварца, вырезанного особым образом. *Sci. Rep. Tohoku Univ.* 24, 538, 1935.
13. Мюллер Р. Л. Электропроводность твердых ионно-атомновалентных веществ. *ЖТФ*, 25, в. 2, 236—245, 246—255, 1955.

14. Чирков Н. К вопросу о поверхностной электропроводности твердых диэлектриков. ЖФХ, **21**, 11, 1613, 1947.
15. Гапан В. Об электропроводности плавленного кварца. Zs. Physik. Bd. **66**, II, 3—4, 436, 1930.
16. Иоффе А. Ф. Упругие и электрические свойства кварца. Изв. Петрогр. политех. ин-та, отд. тех. естеств. и матем. **24**, 1, 27, 1915.
17. Шапошников А. А. Влияние температуры на электропроводность кристаллического кварца. ЖРФХО ч. физ. **46**, 7, 265, 1914.
18. Vogel R. C., Gibson G. Миграция ионов натрия через кварцевую пластинку в электрическом поле. Journ. Chem. Phys. **18**, № 4, 490, 1950.
19. Саржевский П. Е. Зависимость электропроводности кварца от электрического поля, температуры и магнитного поля. ДАН СССР, **82**, № 4, 571, 1952.
20. Харьков А. А. и Водопьянов К. А. Силикатные стекла в полях ультра-высокой частоты. ЖТФ, **8**, 10, 910, 1938.
21. Александров Б. И., Кобеко П. П. и Кувшинский Е. В. Изучение аморфного состояния. ЖТФ, **6**, 1311, 1936.
22. Водопьянов К. А. К вопросу о диэлектрических потерях в кристаллах при высокой частоте. Тр. СФТИ, в. **24**, 144, 1947.
23. Водопьянов К. А. и Кривов К. А. Исследование угла диэлектрических потерь в простых силикатных и борных стеклах в зависимости от концентрации ионов примеси и частоты электрического поля. Тр. СФТИ, в. **24**, 150, 1947.
24. Сапельков Л. И. Новые электроизоляционные материалы. Электричество, № 7, 3739, 1935.
25. Works C. N., Dakin T. N., Boggs F. Использование резонатора для измерения диэлектрических свойств при ультравысоких частотах. PIRE **33**, № 4, 245, 1945.
26. Race H. H., Leonard S. C. Измерение диэлектрических потерь в твердых телах калориметрическим методом. Trans. Amer. Inst. El. Eng. vol **55**, p. 1347, 1936.
27. Кобеко П. П., Коровник Л. В., Кувшинский Е. В. и Нелидов И. Ю. Электрические свойства кварца, изготовляемого заводом им. Ломоносова. ИЭСТ, № 8—9, 51, 1936.
28. Ворожцов Б. И. Некоторые электрические свойства плавленного кварца при высоких частотах, повышенных напряжениях и высоких температурах. Изв. Томского политехн. ин-та, т. **91**, 363, 1956.
29. Богородицкий Н. П. и Фридберг И. Д. О характере температурной зависимости диэлектрических потерь при поляризации ионных соединений. ЖТФ, **26**, № 9, 1884, 1956.
30. Харьков А. А. Диэлектрические потери в кристаллическом и плавленном кварце на высоких частотах. СФТИ, 1947.
31. Ворожцов Б. И. Методика измерения диэлектрических потерь при высоких температурах и высоких частотах Тр. СФТИ. в. **35**, 50, 1956.
32. Диэлектрические потери в стекле. Вестник информации № 22, 13, 1952.
33. Иоффе В. А. Диэлектрические потери в силикатных стеклах. ЖТФ, **24**, 4, 611—621, 1954.
34. Volger J, Stevels J, Amerongen C. Диэлектрические потери различных монокристаллов кварца при очень низких температурах. Philips Res. Rep. vol **10**, p. 260, 1955.
35. Jatkar S. K. K. and Yengar B. R. Y. Диэлектрическая постоянная кварца. Indian Journ. Phys. and Proc. Ind. Ass. for Cult. Science **4**, vol **23** 32, 145, 1949.
36. Богородицкий Н. П. и Малышев В. Н. Диэлектрические потери в стеклах ЖТФ, **5**, в. 4, 639, 1935.
37. Чмутин М. С. Зависимость диэлектрической проницаемости кристалла от температуры. ЖЭТФ, **26**, в. 5, 640, 1954.
38. Шапошников А. А. Электропроводность кристаллического кварца и отклонение от закона Ома. ЖРФХО, ч. физ. **42**, в. 8, 1910.
39. Гохберг Б. М. Электропроводность диэлектриков. ГТТИ, 1933.