

О ХАРАКТЕРЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ

Характер температурной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ неорганических диэлектриков имеет важное значение с точки зрения практического использования материалов, но, кроме того, вид этой зависимости позволяет в известной степени судить о самом механизме диэлектрических потерь.

В многочисленных работах, посвященных указанному вопросу, отмечается, что в некотором интервале температур $\operatorname{tg} \delta$ не зависит от температуры, или, что $\operatorname{tg} \delta$ непрерывно возрастает с температурой или, наконец, что $\operatorname{tg} \delta$ имеет экстремальное значение при определенной температуре. Сканави [1] подытожил имевшиеся взгляды и предложил различать для стекол:

а) структурные диэлектрические потери, которые не зависят от температуры;

б) релаксационные диэлектрические потери;

в) потери проводимости.

В последнее время в связи с резко возросшими требованиями в отношении электрических свойств высокочастотной изоляции возникла необходимость более тщательного изучения диэлектрических потерь ионных соединений при высоких частотах.

С этой целью нами были вновь изучены диэлектрические потери ряда простых боратных и силикатных стекол, а также наиболее качественных видов высокочастотной керамики.

Методика исследований

Изучению были подвергнуты борные стекла—чистый борный ангидрид, борно-натриевые стекла при разном соотношении B_2O_3 и Na_2O , борно-бариевые стекла, технические бесщелочные силикатно-бариевые и силикатно-свинцовые стекла. Кроме того, были исследованы некоторые керамические материалы со сравнительно невысокими электрическими характеристиками, радиофарфор, изоляторный фарфор и наиболее качественные виды керамики с большим содержанием кристаллической фазы—стеатит, ультрафарфор, шпинелевая и цельзиановая керамика. Опытные образцы борных стекол готовились путем варки в платиновом тигле с применением химически чистых реактивов (борная кислота, гидрат окиси бария, углекислый натрий). Расплавленное стекло выливалось на разогретую до 300° чугунную плиту с выточкой диаметром 30—40 мм, глубиной 1,5—2,0 мм. Полученные образцы в виде дисков подвергались отжигу в течение 10—12 часов. После отжига образцы шлифовались с применением керосина или скипидара. Электродами служило серебро, нанесенное вжиганием (для силикатных стекол) и серебряные шлифованные диски, которые в процессе

измерения плотно прижимались пружиной к поверхности образца (для борных стекол).

Образцы керамики изготавливались по обычной керамической технологии с применением технических сырьевых материалов и имели форму дисков диаметром 20—30 мм при толщине 1,5—2,0 мм. Electroдами служило нанесенное вжиганием серебро.

Измерение диэлектрических потерь при радиочастотах производилось с помощью куметра и прибора ИП-3, а также установки для измерения потерь по методу изменения реактивного сопротивления. При низких частотах измерения производились с помощью мостов МЛ-Е и МТ-К. При измерениях на низких температурах образцы помещались в вакуумную колбу, которая охлаждалась в сосуде Дьюара.

Результаты опытов и их обсуждение

Приведенная на рис. 1 температурная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ борного стекла показывает заметно меньшее значение диэлектрических потерь сравнительно с литературными данными, а также наличие возрастания $\operatorname{tg} \delta$ с температурой в отличие от ранних данных.

На рис. 2, 3 и 4 представлены зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для борно-щелочных и борно-бариевых стекол. Вновь нужно отметить заметное возрастание диэлектрических потерь в том интервале температур, для которого ранее этой зависимости ошибочно не наблюдалось.

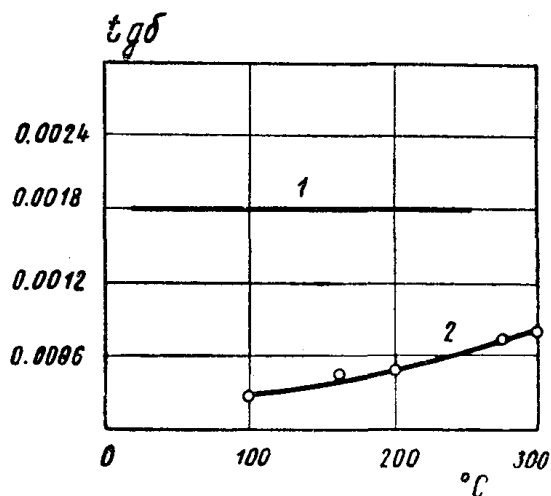


Рис. 1

Иной характер зависимостей $\operatorname{tg} \delta$ от температуры наблюдается для силикатных стекол. На рис. 5 и 6 даны температурные зависимости $\operatorname{tg} \delta$ для бесщелочных силикатно-бариевых и силикатно-свинцовых стекол. В данном случае обнаруживается минимум потерь, как это наблюдала также в своей работе В. А. Иоффе [3]. И здесь вновь не подтверждается независимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры.

При исследовании керамических материалов также установлено во всех случаях отсутствие участка температур, где потери не зависят от температуры. На рис. 7 представлена температурная зависимость в широком интервале температур для изоляторного фарфора и радиофарфора. На рис. 8, 9, 10, 11 показаны зависимости $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ от температуры для стеатита и рутиловой керамики по данным Хиппеля [4].

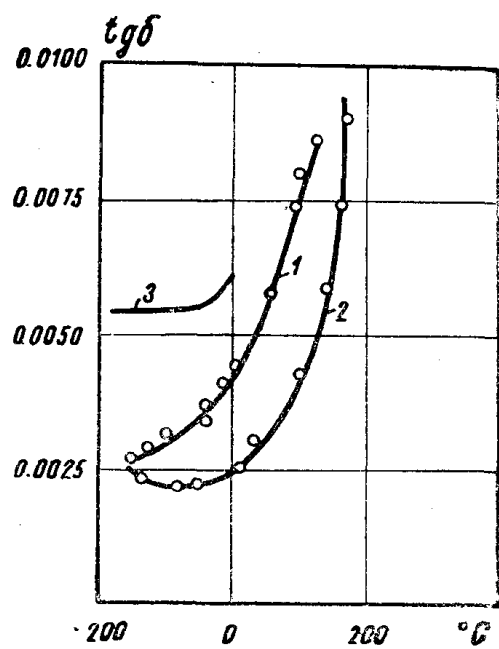


Рис. 2

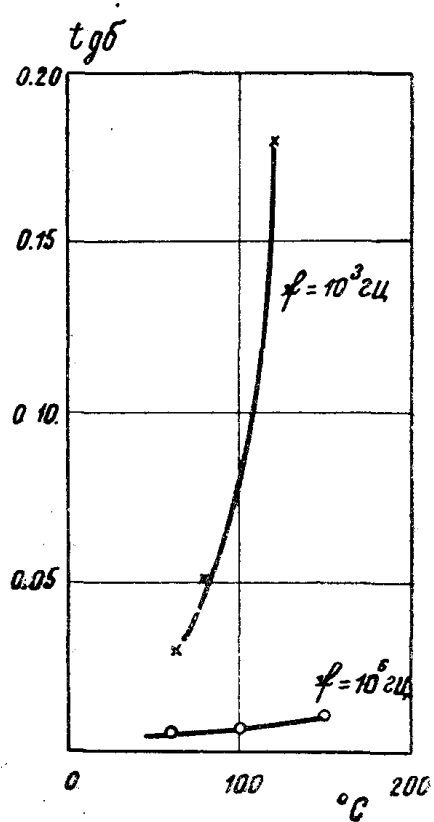


Рис. 3

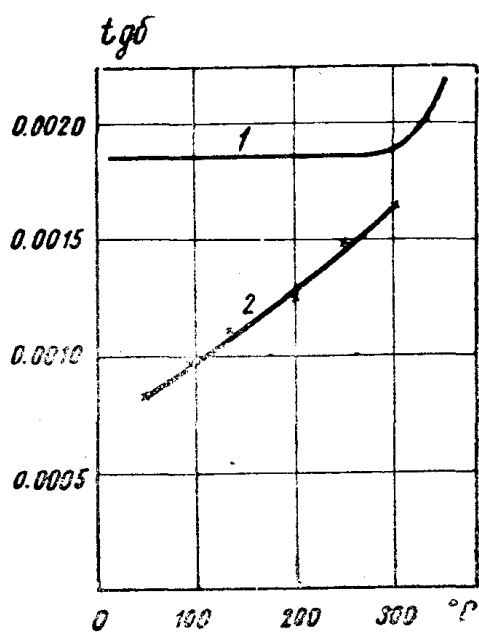


Рис. 4

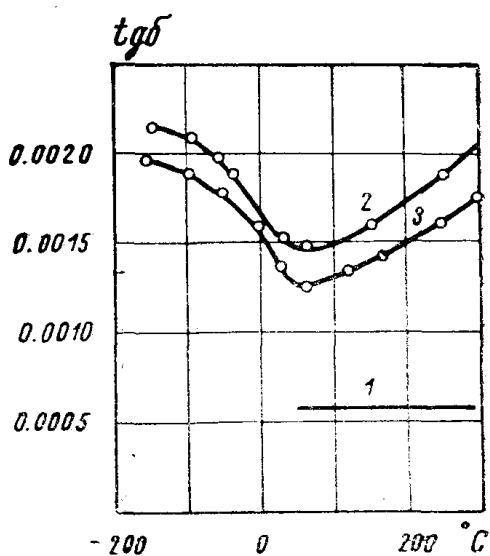


Рис. 5

На рис. 12 даны температурные зависимости $\operatorname{tg} \delta$ при $f = 1 \cdot 10^6$ гц ряда керамических материалов, применяемых в отечественной промышленности.

Обобщая изложенный выше экспериментальный материал, можно утверждать, что в широком интервале температур и частот диэлектрические потери при поляризации ионных соединений обусловлены одним и тем же

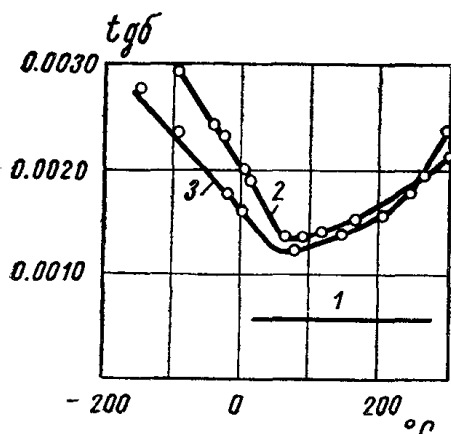


Рис. 6

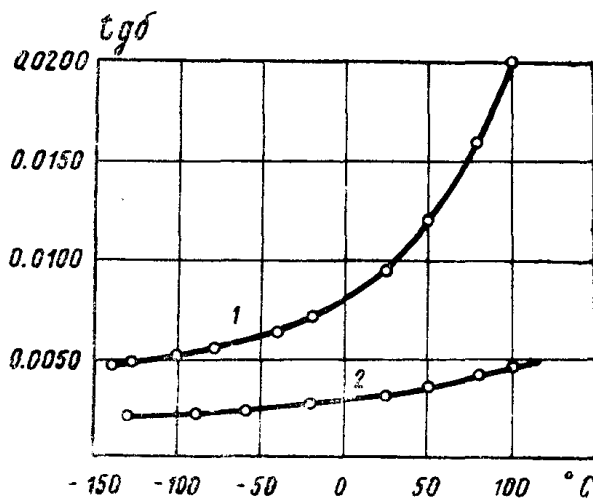


Рис. 7

явлением—нарушением теплового движения ионов при воздействии электрического поля, которое проявляется тем резче, чем ближе совпадают период электрического поля и время релаксации частиц. При этом необходимо иметь в виду, что частицы совершают сложные тепловые движения—

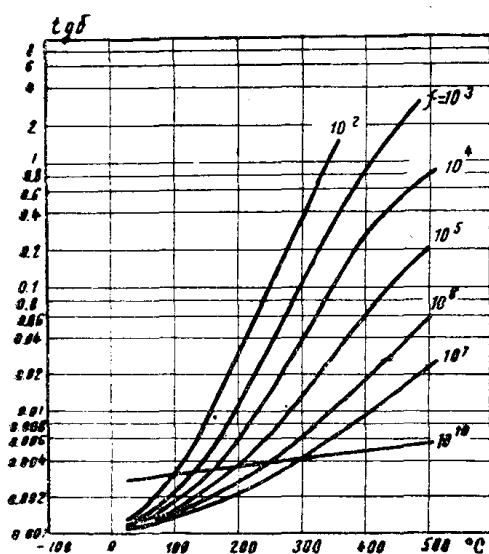


Рис. 8

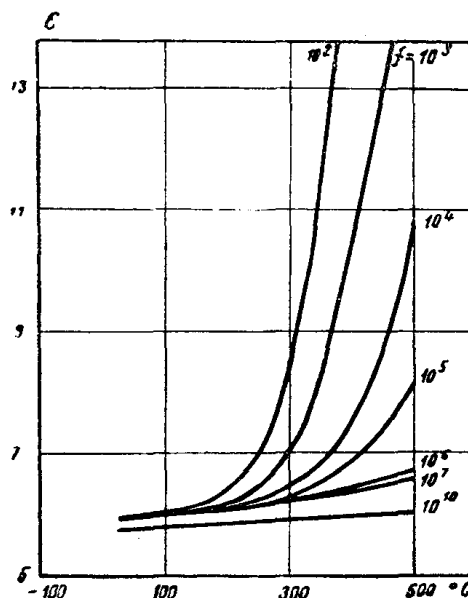


Рис. 9

перебросы в пространстве из одного положения равновесия в другое и вибрацию (вращения) с так называемой собственной частотой колебаний частиц.

При низких частотах тепловое движение ионов оказывает влияние на диэлектрические потери почти также, как на сквозную электропроводность,

почему и наблюдается резкий рост $\operatorname{tg} \delta$ с температурой, начиная с невысоких значений ее. По мере повышения частоты электрическое поле все

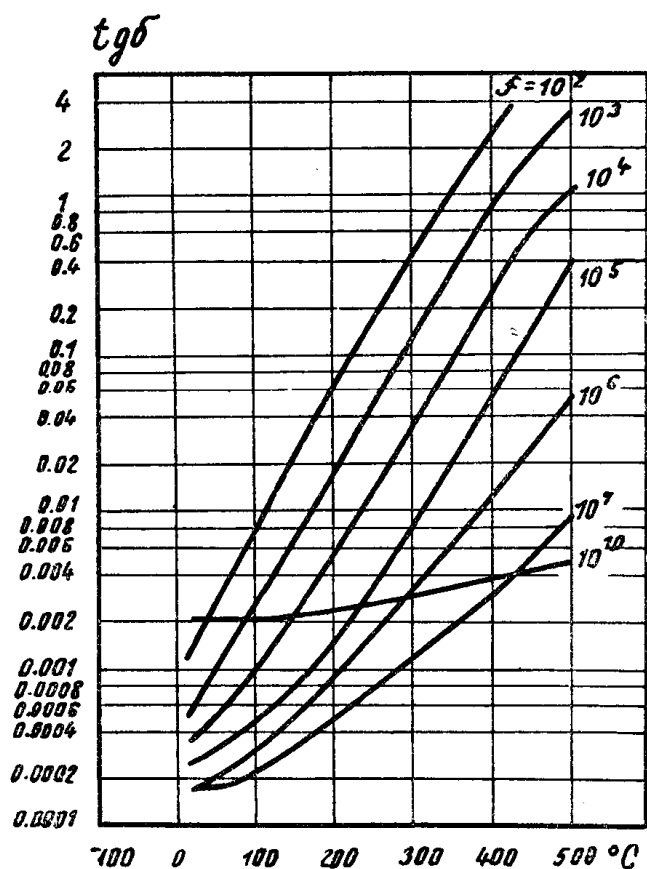


Рис. 10

меньше и меньше успевает ориентировать ионы при их тепловых перебросах и $\operatorname{tg} \delta$ изменяется с температурой все меньше и меньше. Рис. 8 и 10

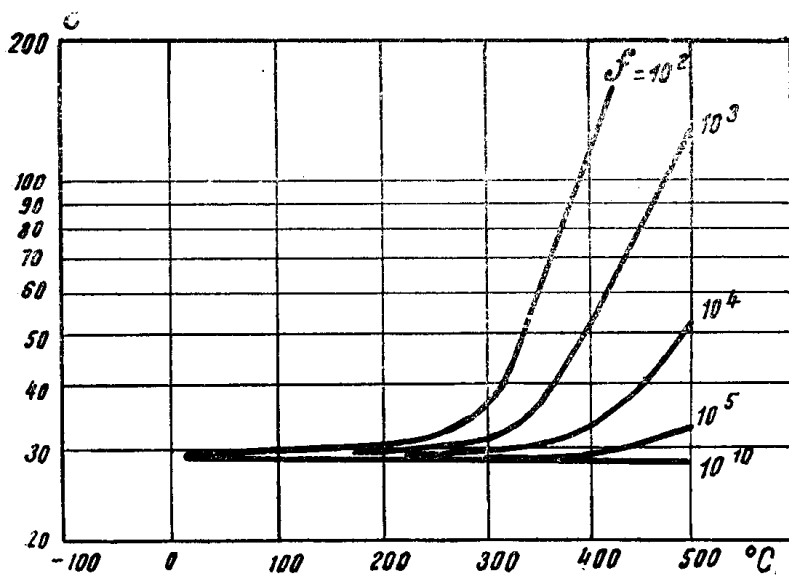


Рис. 11

показывают, что при частоте $f=10^{10}$ гц температурная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ радиокерамики почти не наблюдается. Веера кривых $\operatorname{tg} \delta = f(t^\circ)$ и $\varepsilon = f(t^\circ)$ при разных частотах являются с этой точки зрения вполне закономерными.

В связи с указанным едва ли целесообразно разделять диэлектрические потери в ионных соединениях, как это показывает Сканави (рис. 14, 1),

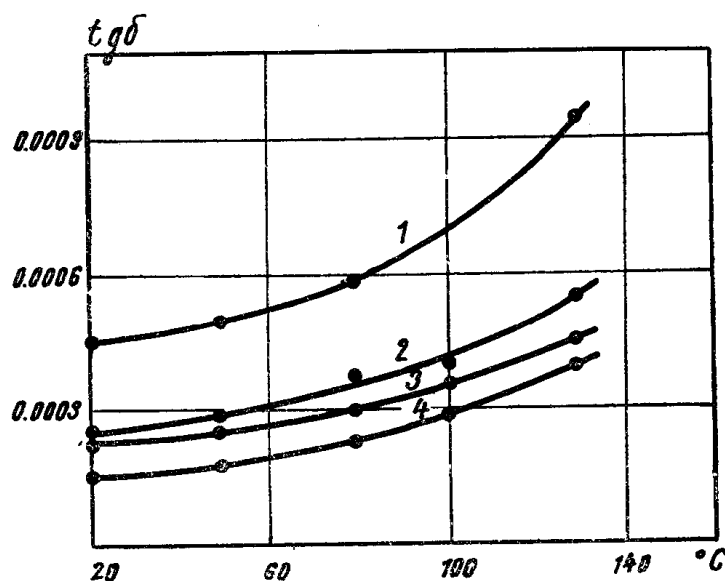


Рис. 12

на три составляющие. Можно полагать, что данные о независимости $\operatorname{tg} \delta$ от температуры были обусловлены недостаточной точностью измерительных приборов, использовавшихся около 20 лет тому назад [2, 5].

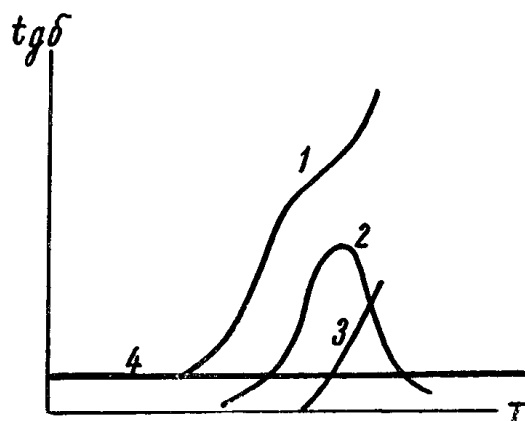


Рис. 13

Диэлектрические потери, вызываемые явлением релаксации (ослаблением теплового движения ионов или диполей электрическим полем), согласно установившейся терминологии принято характеризовать наличием частотного и температурного максимумов. Однако не следует упускать из вида, что релаксационные процессы в той или иной форме неизбежно сопутствуют поляризации диэлектрика, связанной с тепловым движением частиц. С этой точки зрения потери вследствие электропроводности и потери при сверхвысоких частотах, которые иногда называют резонансными,

можно считать частными случаями релаксационных, хотя указанные механизмы диэлектрических потерь сопровождаются новыми явлениями.

Как известно, $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика при потерях электропроводности однозначно изменяется с частотой и температурой.

Что касается диэлектрических потерь при сверхвысоких частотах, то большой экспериментальный материал показывает, что в пределах до $f = 2 - 3 \cdot 10^{10}$ гц $\operatorname{tg} \delta$ самых различных диэлектриков возрастает, а диэлектрическая проницаемость уменьшается. Увеличение диэлектрической проницаемости при сверхвысоких частотах обнаружено лишь для немногих диэлектриков, в частности, для некоторых газов.

На основании вышеизложенного нам представляется, что диэлектрические потери можно свести в основном к следующим физическим процессам:

1. Явлению релаксации при поляризации, связанной с тепловым движением частиц и проявляющейся при низких частотах, радиочастотах, сверхвысоких частотах, характерной для твердого, жидкого и даже газообразного состояния вещества.

2. Явлению релаксации при электропроводности, также связанной с тепловым движением частиц.

3. Явлению ионизации вещества, обычно газа, свободного или распределенного в твердом теле, проявляющемуся в электрических полях повышенной напряженности.

Автор выражает благодарность к. х. н. Мазурину О. В. и инженеру Чихановой Л. П., участвовавших в экспериментальных работах по изучению электрических свойств стекла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сканава Г. И. Диэлектрическая поляризация и потери в стеклах и керамических материалах с высокой диэлектрической проницаемостью. Госэнергоиздат, 1952.
2. Богородицкий Н. П. и Фридберг И. Д. ЖТФ, **7**, 18—19, 1952.
3. Иоффе В. А. ЖТФ, **22**, 4, 1952.
4. Hippel A. Dielectric Materials and Applications, 1954.
5. Сканава Г. И. ЖТФ, **7**, 10, 1937.

Ленинградский Электротехнический институт
им. В. И. Ульянова—Ленина.