

Стекла для СВЧ устройств

Приведен обзор проблем, связанных с применением стеклообразных диэлектриков в современных СВЧ устройствах. Отмечено, что практически полностью отсутствуют надежные данные по свойствам уже применяемых стекол и почти нет данных о разработке новых перспективных составов, в особенности кристаллизующихся и микро неоднородных стекол. С другой стороны, обращено внимание на отсутствие приборов и устройств СВЧ для изучения свойств диэлектриков в актуальных в настоящее время диапазонах частот и рабочих температур, доступных для разработчиков новых материалов. Намечены пути ликвидации лагун, образовавшихся в указанной области за последние десятилетия.

Ключевые слова: Диэлектрики для СВЧ, свойства стекол при высоких частотах, диэлектрические потери в стеклообразных диэлектриках.

Устройства СВЧ все шире внедряются в авиационную, космическую и даже бытовую технику. Эксплуатационные характеристики СВЧ устройств во многом определяются свойствами выбранных материалов, которые по характеру взаимодействия с электромагнитным полем (ЭМП) можно разделить на две большие группы [1]: конструкционные материалы, не взаимодействующие с ЭМП, и материалы, взаимодействующие с ЭМП. Если к материалам первой группы не предъявляются требования в отношении их свойств на СВЧ, то для материалов второй группы эти требования оказываются обязательными, особенно, если речь идёт о миллиметровых волнах большой мощности.

В обширной группе сверхвысокочастотных материалов особое место занимают твёрдые диэлектрики, которые одновременно являются и конструкционными материалами. В [2] был приведен анализ механической прочности элементов конструкционной оптики, выполненных из полимерных и неорганических стекол. Целью данного сообщения является анализ имеющихся результатов исследования свойств материалов в диапазоне СВЧ и проблем создания новых материалов для бурно развивающейся техники СВЧ устройств.

Особенности диэлектрических свойств стекол

Диэлектрические потери стекол изучены значительно хуже, чем электропроводность стекол [3]. Поэтому такой подробной картины, которая была дана в [4] для электропроводности стекол для диэлектрических потерь получить пока невозможно. Обзор экспериментальных частотных и температурных зависимостей потерь в стеклах, керамике, ситаллах для диапазона СВЧ был приведен в [5]. В информационной базе SciGlass [6], в которой собраны многочисленные данные по всем свойствам стекол, опубликованные в мировой литературе, насчитывается более 350 000 составов стекол. Если к середине прошлого века число исследований электропроводности и диэлектрических потерь было примерно равным (83 и 86 соответственно), то уже через десятилетие эти числа изменились радикально (см. рис. 1).

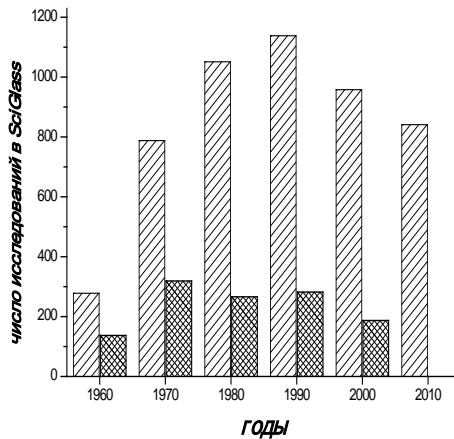


Рис. 1. Абсолютное число публикаций в информационной базе SciGlass, содержащих данные по исследованию электропроводности (помечены как ρ) и диэлектрических свойств (помечены как ϵ) в XX веке, выполненных за указанные десятилетия.

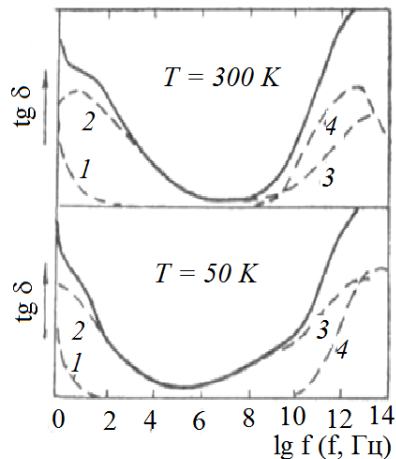


Рис. 2. Частотные зависимости диэлектрических потерь стекол при разных температурах [7]. Сплошная линия показывает суммарные потери; штриховые линии отвечают потерям: 1 – проводимости; 2 – релаксационным; 3 – деформационным; 4 – вибрационным.

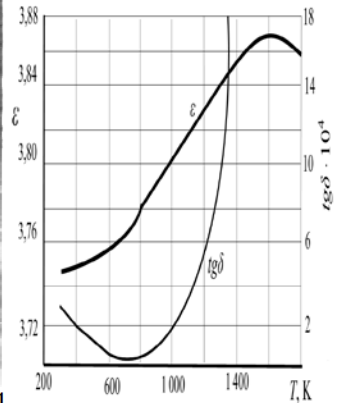


Рис. 3. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла потерь $\text{tg } \delta$ кварцевого стекла на частоте $f = 10^{10}$ Гц [1]

В отличие от электропроводности стекла, преобладающий механизм диэлектрических потерь при разных температурах и при разных частотах может быть различным. Понятно, что изменение механизма явления вызывает и изменение зависимостей от частоты, температуры и состава стекла. Единая точка зрения по поводу наиболее рациональной классификации потерь в настоящее время отсутствует и будем следовать классификации, предложенной Стевелсом в [7], прежде всего потому, что она была основана на результатах исследования стекол в наиболее широком диапазоне температур и частот. За прошедшие годы более полного исследования выполнено не было. На рис. 2 приведена схема из работы Стевелса [7], изображающая общий характер частотной зависимости суммарных диэлектрических потерь стекла при двух различных температурах, а также частотные зависимости отдельных видов потерь, из которых складываются общие потери.

Разберем подробнее рис. 2. Как видим, автор [7] предположил существование в стекле потерь, характеризующихся четырьмя принципиально различными механизмами, на что было обращено внимание и в [3]. Эти механизмы не представляют собой чего-то специфического для стекла и поэтому в основных чертах соответствуют тем видам потерь, которые были описаны для диэлектриков [3].

1. Потери проводимости возрастают при увеличении температуры и уменьшении частоты.

2. Релаксационные потери, вызываемые теми же ионами, что и потери проводимости, но способными перемещаться лишь в ограниченных областях. Релаксационные потери выявляются при более низкой температуре и при более высокой частоте, чем потери проводимости. При увеличении температуры максимум релаксационных потерь сдвигается в область более высоких частот, при увеличении частоты — в область более высоких температур.

3. Деформационные потери, носящие вполне четко выраженный характер релаксационных потерь, но со средней эффективной энергией активации в несколько раз меньшей, чем соответствующая энергия потерь второго типа. Частотный максимум деформационных потерь, как и любых потерь релаксационного типа, должен при снижении

температуры сдвигаться в сторону низких частот. Температурный максимум при снижении частоты должен смещаться в сторону низких температур.

4. Вибрационные потери, природа которых строится на выводах квантовой механики так, что при снижении температуры максимум этого вида потерь должен смещаться в область более высоких частот.

Подчеркну, что два вида (2 и 3) потерь - релаксационные и деформационные - характеризуются релаксационным механизмом. Однако при изучении экспериментальных данных целесообразно, несмотря на общность механизмов, разделить эти два вида потерь, так как они характеризуются различными количественными закономерностями.

Требования к параметрам диэлектриков для СВЧ

Почти всегда наиболее жёсткие требования к радиотехническим параметрам диэлектриков предъявляются в связи с особыми условиями их эксплуатации [1]. В частности, следует отметить высокие требования к стабильности параметров и характеристик диэлектриков, испытывающих температурные воздействия. Свойства большинства известных СВЧ диэлектриков заметно зависят от температуры (см. рис. 3), что в итоге изменяет эксплуатационные характеристики радиотехнических свойств в целом.

Это стимулирует разработку новых нагревостойких и термостабильных диэлектрических материалов и разработку новых методов и специализированной исследовательской аппаратуры для измерения на сверхвысоких частотах температурных зависимостей свойств материалов при теплофизических условиях, подобных эксплуатационным. Известные, ставшие классическими, методы определения температурных зависимостей параметров СВЧ диэлектриков: волноводные, резонаторные, оптические и некоторые другие – не всегда решают задачу должным образом. У волноводных и резонаторных методов верхний температурный предел, достигаемый при исследованиях диэлектриков, относительно невелик, и не всегда существует возможность получить необходимые данные для расчёта конструкции СВЧ прибора, работающего при высоких температурах.

Упомянутые методы фактически не дают сведений о динамической зависимости параметров диэлектрических СВЧ материалов от температуры в процессе нагрева. Следует подчеркнуть, что в современной измерительной СВЧ технике не решена также задача измерения параметров диэлектрических материалов при изменении их физического состояния при одновременном воздействии на них лазерного и микроволнового ЭМП. Исследования такого рода часто необходимы для теории и практики проектирования различных новых устройств. На пути решения этой комплексной задачи встречаются значительные теоретические трудности, которые до настоящего времени ещё не преодолены.

Имеющееся недопустимо большое расхождение между требуемыми и достигнутыми в исследованиях верхними температурными границами, видимо, связано с ограниченным числом исследований в области частот, представляющей интерес для техники СВЧ устройств.

Необходимы также динамические исследования температурных зависимостей свойств СВЧ-диэлектриков. Исследование диэлектриков в различных температурных условиях позволяет перейти к прогнозированию эксплуатационных параметров и характеристик изделий из этих материалов. Отсутствие необходимых сведений о свойствах и поведении СВЧ-диэлектриков в условиях высоких температур затрудняет, а иногда и совершенно исключает прогнозирование свойств изделий. В то же время даже исчерпывающие сведения о температурных зависимостях свойств СВЧ-диэлектриков не

всегда позволяют расчётным путём определить характеристики изделий при интенсивном их нагреве и тепловом ударе.

Представляется целесообразным вместо натуральных дорогостоящих испытаний применить метод свидетеля, широко применявшийся нами при поиске более коротких режимов отжига экрано-масочных узлов цветных кинескопов. Иначе говоря, на основе результатов испытаний исходного материала, проведенных в условиях, подобных (адекватных) эксплуатационным, предсказываются характеристики непосредственно СВЧ-устройств, которые будут иметь место в натуральных условиях. Подобное прогнозирование возможно на основе анализа и специальной обработки результатов измерений следующих электрических и радиотехнических характеристик:

1) температурно-временных зависимостей теплофизических характеристик материала диэлектрика;

2) температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для рабочих температур изделия;

2) температурных изменений модуля и фазы коэффициента прохождения, измеряемых для диэлектрических образцов в температурных условиях, адекватных натурным;

3) шумовых характеристик диэлектрика.

В [1] описана структура установки, позволяющей методом короткого замыкания (К.З.):

– измерять ϵ и $\text{tg}\delta$ диэлектриков при температурах, не превышающих размягчение диэлектрика (дальнейшее повышение температуры ограничено температуро-устойчивостью материалов волноводов, находящихся в непосредственном тепловом контакте с исследуемым образцом);

– определять $\text{tg}\delta$ диэлектриков, величина потерь которого превышает 0,001;

– измерять при нормальной температуре ϵ с погрешностью до 0,2...0,5 %, $\text{tg}\delta$ с погрешностью, не превышающей 1...3 %.

С повышением температуры погрешность, вероятно, может увеличиться и составить уже при температурах выше 1300 К $\pm 1...7$ % для ϵ и $\pm 10...25$ % для $\text{tg}\delta$.

Заключение

Изложенный материал, хотя и носит фрагментарный характер, в то же время отражает новейшие тенденции в разработке методов и аппаратуры для исследования на СВЧ радиотехнических материалов и, тем самым, формулирует новые направления в области разработки и исследования новых диэлектрических материалов для СВЧ и изделий на их основе для летательных аппаратов.

Библиографический список

1. Физика нагрева СВЧ-диэлектриков летательных аппаратов и их защита / Под общ. ред. М.Я. Воронина. – Новосибирск: СГГА, 2008. – 156 с.
2. Старцев Ю. К. Физические и химические основы конструкционной оптики: остекление воздушных транспортных средств. Уч. пос. С.-Петербург: СПбГУГА, 2011. - 255 с.
3. Сканава Г.И., Физика диэлектриков (Область слабых полей), М. — Л., 1949.
4. Мазурин О.В. Электрические свойства стекла. Л.: Тр. ЛТИ им. Ленсовета. 1962. Вып. 62. 162 с.
5. Машкович, М. Д. Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ. – М.: Сов. радио, 1969. - 240 с.
6. Stevels J.M. Progress in the theory of the physical properties of glass. Monographs on the progress of research in Holland during the war. Amsterdam — Elsevier. 1948. Vol. 20. 104 ps.

7. Старцев Ю. К. Релаксационные явления в стеклах в интервале стеклования при отжиге, ионном обмене стекла с расплавом соли и в спаях: Дисс. д. физ.-мат. н.- Санкт-Петербург, 2001.- 301 с.