

*Ларчук Д.А.<sup>1</sup>, Старцев Ю.К.<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет  
гражданской авиации*

*<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический  
институт (технический университет)*

## **Диэлектрические материалы для СВЧ устройств**

*Приведен анализ проблем с импортозамещением диэлектриков в СВЧ устройствах. Отмечено, что в настоящее время практически полностью отсутствуют измерительные средства для получения надежных данных по температурным и частотным зависимостям свойств уже применяемых материалов, в частности, стекол, и почти нет данных о разработке новых перспективных составов, в особенности кристаллизующихся и микрогетерогенных стекол. 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. Разработчикам материалов нужна реальная помощь в создании устройств для сертификации новых материалов.*

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

В разработке новых материалов для СВЧ устройств наметился, а местами уже произошел качественный скачок: переход к производству интегральных устройств выявил неэффективность традиционного разделения между обязанностями разработчика аппаратуры, конструктором и технологом-материаловедом, который должен обладать определенным багажом знаний в смежных областях, и прежде всего, в области технологии изготовления микросхем, конструирования [1]. Материаловед должен также четко представлять условия, в которых будет работать разрабатываемый материал, принципы действия функциональных элементов СВЧ устройств, уметь использовать аналитический и графический материал для моделирования узлов и расчета их топологий, конструкторского проектирования устройств СВЧ в целом. Эксплуатационные характеристики СВЧ устройств во многом определяются свойствами выбранных материалов, которые по характеру взаимодействия с электромагнитным полем (ЭМП) можно выделить две большие группы [2]: 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 идет о миллиметровых волнах большой мощности.

Особую важность анализ существующего положения с разработкой и продвижением на рынок новых отечественных материалов приобретает теперь в связи с необходимостью импортозамещения, то есть процесса последовательной замены на внутреннем рынке импортных товаров на продукцию отечественного производства, не уступающую по цене, качеству и функциональным возможностям [3].

Импортозамещение является «процессом сокращения или прекращения импорта определенных товаров, посредством их замещения на внутреннем рынке страны

аналогичными отечественными, адекватными или обладающими более высокими потребительскими свойствами и стоимостью не выше импортных». Под стратегией импортозамещения понимают «рассчитанную на долгосрочную перспективу систему мер, обеспечивающих достижение намеченных целей по объемам и структуре производства отечественной продукции при одновременном снижении потребления импортных товаров» [3].

В обширной группе сверхвысокочастотных материалов особое место занимают твёрдые керамические диэлектрики, которые одновременно являются и конструкционными материалами [4,5]. В [6] был приведен анализ механической прочности элементов конструкционной оптики, выполненных из полимерных и неорганических стекол. Целью данного сообщения является анализ имеющихся результатов исследования свойств стеклообразных материалов в диапазоне СВЧ и проблем создания новых материалов для бурно развивающейся техники таких устройств, включающей аппаратуру систем управления воздушным движением, аэродромные и трассовые локаторы, радиолокатор обзора летного поля, посадочные радиолокаторы, спутниковые системы связи, посадочные микроволновые системы в гражданской авиации.

### **Особенности диэлектрических свойств стекол**

Диэлектрические потери стекол изучены значительно хуже, чем электропроводность стекол. Поэтому такой подробной картины, которая была дана с [7,8] 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 [9]. Приходится с сожалением констатировать, что за прошедшие полстолетия после выхода книги [9] и прогресса, достигнутого при разработке новых нагревостойких и термостабильных диэлектрических материалов, появление новых методов и специализированной исследовательской аппаратуры для измерения на сверхвысоких частотах температурных зависимостей свойств материалов при теплофизических условиях, подобных эксплуатационным, было крайне редким явлением. Так, в монографии [10] приведены описания многих известных, ставших теперь классическими, методов определения температурных зависимостей параметров сверхвысокочастотных диэлектриков: волноводные, резонаторные, оптические и некоторые другие, – но совершенно отсутствуют рекомендации аналогов отечественного оборудования для таких исследований.

В отличие от электропроводности стекла, 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 [11], 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. 1 приведена схема из [11], 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.

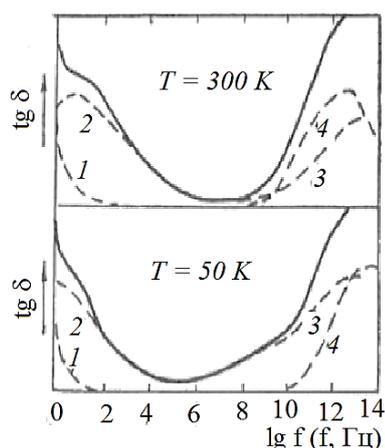


Рис. 1. Частотные зависимости диэлектрических потерь стекол при разных температурах [11]. Сплошная линия показывает суммарные потери; штриховые линии отвечают различным видам потерь: 1 –

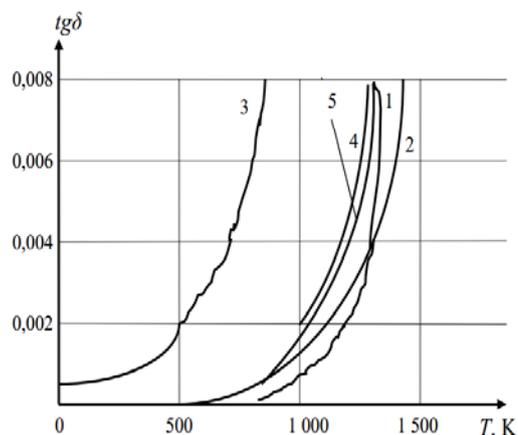


Рис. 2. Зависимость  $\text{tg} \delta$  на частоте  $f = 10^{10}$  Гц: 1 – окись алюминия; 2 – окись бериллия; 3 – окись кремния; 4 – нитрид бора; 5 – окись кремния [12]

Отметим важные закономерности, вытекающие из рассмотрения рис. 1–2:

- относительная девиация  $\epsilon$  и  $\text{tg} \delta$  даже у современных СВЧ-диэлектриков достигает значительных величин;
- приводимые в литературе экспериментальные температурные зависимости  $\epsilon$  и  $\text{tg} \delta$  редко превышают температуру 600 К;
- вся имеющаяся информация о температурных зависимостях  $\epsilon$  и  $\text{tg} \delta$  соответствует только медленным температурным изменениям и никак не отражает свойств материала при тепловом нагреве (импульсный режим включения и выключения луча лазера) или тепловом ударе.

Аналитические методы теплофизических расчётов разработаны детально, но их точность определяется в основном достоверностью исходных данных и зависит, в частности, от степени не учитываемой девиации электрических параметров диэлектрика, имеющей место при высоких температурах.

Эти механизмы не представляют собой чего-то специфического для стекла и поэтому в основных чертах соответствуют тем видам потерь, которые были описаны для диэлектриков [14].

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

2. Релаксационные потери, вызывают те же ионы, что и потери проводимости, но способные 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 этого вида потерь при снижении частоты будет 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.

Подчеркнём, что приведённые выше виды потерь 2 и 3 - релаксационные и деформационные – характеризуются релаксационными механизмами. Однако при изучении экспериментальных данных целесообразно, несмотря на общность механизмов, разделить их, так как они характеризуются различными количественными закономерностями.

Современное состояние теории диэлектрической поляризации не позволяет установить чёткие аналитические связи между характеристиками диэлектрика и такими внешними факторами, как температура, давление, плотность вещества, частота внешнего электромагнитного поля и др. Совершенно отсутствуют предпосылки, позволяющие аналитически описать температурные зависимости  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  диэлектриков при частичном изменении фазы и состояния материала в результате высокотемпературного нагрева. На пути решения этой комплексной задачи встречаются значительные теоретические трудности, которые до настоящего времени ещё не преодолены.

### **Требования к параметрам диэлектриков для СВЧ**

Почти всегда наиболее жёсткие требования к радиотехническим параметрам диэлектриков предъявляются в связи с особыми условиями их эксплуатации [12]. В частности, следует отметить высокие требования к стабильности параметров и характеристик диэлектриков, испытывающих температурные воздействия. Свойства большинства применяемых теперь СВЧ диэлектриков заметно зависят от температуры (см. рис. 2), что в итоге сильно изменяет эксплуатационные характеристики и часто значительно усложняет схемы радиотехнических устройств в целом.

Это стимулирует разработку новых нагревостойких и термостабильных диэлектрических материалов [13] 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 [14, 15], 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 излучения. 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 СВЧ 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 дорогостоящих натурных испытаний применить метод свидетеля, широко применявшийся при поиске более коротких режимов отжига экраномасочных узлов цветных кинескопов [16]. Иначе говоря, на основе результатов испытаний исходного материала, проведенных в условиях, подобных (адекватных) эксплуатационным, предсказываются характеристики СВЧ-устройств, которые с большой вероятностью будут иметь место в натурных 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;
- 3) температурных изменений модуля и фазы коэффициента прохождения, измеряемых для диэлектрических образцов в температурных условиях, близких или адекватных натурным;
- 4) шумовых характеристик диэлектрика.

## **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 гражданской авиации.

## **Библиографический список**

1. Викулов, В. К. СВЧ электроника сегодня – направления и вызовы. Электроника: наука, технология, бизнес. № 3. 2015. С. 64–72.
2. Хохлов, С. В. Перспективы развития отечественной радиоэлектронной промышленности. Радиопромышленность, 2014. Вып. 4. С. 9–18.
3. Ларчук, Д. А., Чайковский Ю. В. Обеспечение безопасности производства и эксплуатации отечественной авиационной техники путем импортозамещения элементной базы РЭА. Тр. XX Всеросс. науч.-практ. конф. РАРАН «Актуальные проблемы защиты и безопасности» (3–6 апреля 2017 г.). Изд. ФГБУ «РАРАН». М – 2017. Т 7. С. 21-26.
4. Богородицкий, Н. П. и др. Радиокерамика. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 553с.
5. Ренне, В. Т. Электрические конденсаторы. Л.: Энергия, 1969. 592с.
6. Старцев, Ю. К. Физические и химические основы конструкционной оптики: остекление воздушных транспортных средств. Уч. пос. С.-Петербург: СПбГУГА, 2011. - 255 с.
7. Сканава, Г. И., Физика диэлектриков (Область слабых полей), М. — Л., 1949. 500с.
8. Мазурин, О. В. Электрические свойства стекла. Л.: Тр. ЛТИ им. Ленсовета. 1962. Вып. 62. 162 с.
9. Машкович, М. Д. Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ. – М.: Сов. радио, 1969. - 240 с.
10. Груздов, В. В., Колковский, Ю. В., Концевой, Ю. А. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. М: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 328с.

11. J. M. Stevels. 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.
12. Физика нагрева СВЧ-диэлектриков летательных аппаратов и их защита / Под общ. ред. М. Я. Воронина. – Новосибирск: СГГА, 2008. – 156 с.
13. K. P. Surendran, P. Mohanan, M. T. Sebastian The effect of glass additives on the microwave dielectric properties of Ba(Mg<sub>1/3</sub>Ta<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub> ceramics. J. Sol. St. Chem. **177** (2004), p. 4031– 046.
14. Yaw, K. C. Measurement of Dielectric Material Properties Application Note. Rhode and Shawrtz Technical Publication. 2012.
15. J. W. Schultz, J. G. Maloney, K Cummings-Maloney, R. B. Schultz, J. G. Calzada, B. C. Foos. A Comparison of Material Measurement Accuracy of RF Spot Probes to a Lens-Based Focused Beam System, AMTA Proccedings, October 2014, Tucson AZ
16. 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.