

Масляков Сергей Александрович

Компьютерное моделирование влияния различия в
термическом расширении волновода и твердого
диэлектрика на результаты измерений ϵ^*
диэлектриков волноводным методом
при высоких температурах

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Отформатировано:
английский (Филиппины)

Удалено: с

Санкт-Петербург – 2005

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор
Полонский Юрий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Михайлов Виктор Федорович

кандидат технических наук,
доцент
Кияткин Родион Петрович

Ведущая организация: ОАО «НИИ «Гириконд»
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «_17_» июня 2005 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета К 212.229.03 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «_16_» мая 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 212.229.03,
к.т.н., доцент

Гумерова Н.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Развитие новых областей науки и техники требует применения диэлектрических материалов, работающих в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) и при высоких температурах (t). Наиболее значимыми потребителями материалов такого рода являются ракетно-космическая и энергетическая промышленности.

Связь с летательными аппаратами и управление ими осуществляются с помощью радиосигналов СВЧ-диапазона, которые принимаются и излучаются антенными системами. Приемно-передающие рупоры антенн и фазированные антенные решетки являются высокоточными, но в тоже время механически слабыми устройствами. В случае спускаемого аппарата, осуществляющего вход в плотные слои атмосферы Земли (или другой планеты), антенная система, расположенная в головной части управляемого объекта, подвергается агрессивному воздействию высоких температур (более 1000°C) и газовых потоков большой скорости. Для обеспечения защиты антенны при сохранении возможности осуществления радиосвязи используются обтекатели, изготовленные из диэлектрических (радиопрозрачных) материалов. Точное знание свойств этих материалов, в первую очередь, температурной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$, является необходимым условием для создания оптимальных по радиопрозрачности обтекателей, которые позволили бы максимально избежать возможности потери радиоконтакта с управляемым объектом.

Использование традиционных исчерпаемых ресурсов для производства энергии приближает топливный кризис в масштабах планеты, поэтому во всем мире ведутся интенсивные исследования в направлении создания альтернативных источников энергии. Одним из них является реакция термоядерного синтеза, при которой ядра изотопов водорода – дейтерия и трития, сливаясь и образуя ядро атома гелия, выделяют большое количество энергии. Конструкция термоядерного реактора (типа токамак), использующего магнитное удержание плазменного шнура в торообразной внутренней полости, в настоящее время разрабатывается международным научным сообществом в рамках проекта ИТЭР. Для поддержания вещества в плазменном состоянии необходима постоянная энергетическая подпитка. Один из перспективных методов такой подпитки осуществляется посредством СВЧ-излучения, попадающего во внутреннюю полость термоядерного реактора через высокотемпературные окна (иллюминаторы) подвода СВЧ-энергии большой мощности, выполненные из диэлектрика. Для создания окна, обеспечивающего максимально эффективный подвод энергии и подвергающегося нагреву до высоких температур, необходимо знать основные диэлектрические свойства используемого материала – относительную диэлектрическую проницаемость (ϵ') и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) при высокой температуре. Аналогичная проблема создания радиопрозрачных в СВЧ-диапазоне окон, подверженных высокотемпературному нагреву, имеет место и для таких источников мощных СВЧ-колебаний для термоядерных реакторов, как гиротроны.

Среди существующих методов измерения ϵ^* материалов в диапазоне СВЧ (волноводный, резонаторный, в свободном пространстве и др.) для исследования диэлектриков при высоких температурах (более 1000°C) наиболее предпочтительным является короткозамкнутый вариант волноводного метода с использованием волновода прямоугольного сечения. Этот метод является

наиболее применимым в указанных условиях за счет ряда преимуществ, в частности, таких как возможность точного учета всех составляющих, влияющих на результат измерения за счет создания полной аналитической картины процессов распространения волны, и возможности измерения диэлектриков с высокими $\text{tg}\delta$, что будет иметь место при высоких температурах из-за преобладающего влияния в общей величине диэлектрических потерь, обусловленных потерями проводимости.

Вместе с тем при применении волноводного метода при высоких температурах возникает систематическая ошибка, связанная с изменением степени заполнения измерительного волновода образцом вследствие различных коэффициентов термического расширения металла волновода и исследуемого твердого диэлектрика. Возникающий газовый (воздушный) или вакуумный зазор между образцом и волноводом является функцией температуры и определяется температурными зависимостями коэффициентов расширения. Уменьшение степени заполнения волновода образцом ведет к возникновению существенной систематической погрешности – измеренные величины ϵ' и $\text{tg}\delta$ с ростом зазора оказываются заниженными по сравнению с результатами, относящимися к случаю полного (что, в принципе, неосуществимо при высоких температурах, кроме случая, когда коэффициенты расширения волновода и диэлектрика равны) заполнения волновода твердым диэлектриком. При этом величина занижения зависит также от температурной зависимости диэлектрических свойств исследуемого материала, в первую очередь, от величины ϵ' .

Учет поправки на величину зазора, возникающего вследствие различий в линейных коэффициентах термического расширения материалов волновода и образца, является сложной вычислительной задачей, требующей большого количества времени для нахождения точного и однозначного решения. Ошибки в определении значения ϵ^* могут привести к выходу из строя изделия, в котором применяется некорректно исследованный диэлектрик. В случае спускаемого аппарата это может привести к потере радиоконтакта на самом ответственном участке траектории при входе в плотные слои атмосферы и потере аппарата, а в случае термоядерного реактора типа токамак последствия могут быть от умеренных (затухание реакции синтеза) до катастрофических (разгерметизация внутренней полости реактора). Таким образом, проблема корректного учета влияния зазора и компьютеризация обработки результатов измерений, связанная с решением трансцендентных уравнений, позволяющие точно и однозначно определить величину ϵ^* , является актуальной задачей, позволяющей в случае эффективного решения избежать потерь дорогостоящего оборудования, которое содержит исследуемые материалы, и значительно сократить время одного полного цикла эксперимента.

Цель работы.

Предложить и реализовать эффективный и точный метод обработки экспериментальных данных, полученных при измерении диэлектрических свойств твердых материалов на СВЧ и при высокой температуре с применением короткозамкнутого волноводного метода с использованием прямоугольного волновода.

Для достижения указанной цели представляется необходимым решить следующие задачи:

1. Произвести математический анализ используемого теоретического аппарата для выбора оптимального метода решения заложенных в него трансцендентных уравнений.

2. Компьютеризировать процесс обработки результатов измерений свойств диэлектриков на СВЧ при высокой температуре волноводным методом, разработав необходимое программное обеспечение (ПО) для современных ЭВМ.
3. Выполнить компьютерное моделирование влияния температурно-обусловленного газового (воздушного) зазора на результаты измерений волноводным методом СВЧ диэлектрических свойств твердых материалов при высоких температурах.

Научная новизна работы.

1. Предложена модификация метода дихотомии с использованием элементов искусственного интеллекта применительно к кусочно-монотонным функциям.
2. Разработан комплекс программного обеспечения, позволяющий обрабатывать результаты измерений и моделировать поведение различных комбинаций материалов диэлектрика и волновода, частоты СВЧ-излучения и температурного режима.
3. Впервые осуществлено компьютерное моделирование влияния температурно-обусловленного газового (воздушного) зазора на результаты измерений свойств диэлектриков в СВЧ-диапазоне при использовании прямоугольных волноводов различной конструкции.

Практическая значимость работы.

1. Сокращено более чем в 4 раза время одного полного цикла эксперимента за счет использования разработанного многоплатформенного портируемого комплекса программного обеспечения. Это достигается ускорением расчетной части примерно в 100 раз.
2. Произведен анализ зависимости измеренной относительной диэлектрической проницаемости от величины зазора в системе волновод–образец, что позволило сократить количество и стоимость экспериментов.
3. Подтверждено с помощью разработанного ПО влияние величины зазора на точность измерений ϵ^* волноводным методом.
4. Программное обеспечение, разработанное в процессе выполнения диссертационной работы, начиная с 2002 года, используется в СПбГПУ в учебном процессе при подготовке инженеров (специалистов) по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» по специальности 140611 «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника» на факультетах: электромеханическом, вечернем электрорадиотехническом, открытого и дистанционного образования.

На защиту выносятся:

1. Математический анализ расчетных уравнений и адаптивная модификация метода дихотомии.
2. Комплекс ПО, позволяющий выполнить анализ результатов измерений волноводным методом и моделирование поведения диэлектриков при различных температурах.
3. Результаты моделирования поведения диэлектриков, полученные с помощью разработанного ПО.

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием современных методов измерения электрофизических характеристик исследуемых материалов; достаточным количеством испытанных образцов; высокой степенью воспроизводимости результатов; их соответствием фундаментальным представлениям и новейшим сведениям, приведенным в отечественных и зарубежных публикациях, а также использованием специальных

вычислительных и алгоритмических методик, в том числе разработанных автором и внедряемых впервые, позволяющих всесторонне изучить поставленную проблему.

Личный вклад автора определяется участием в постановке задачи исследований и в решении поставленных задач с использованием математического аппарата и созданного на основании вычислительного анализа программного обеспечения для цифровых ЭВМ. Он также состоит в обработке, обобщении и анализе полученных результатов. Все приведенные в работе результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях и научных семинарах:

1. Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии–98» (НМТ–98). 17–18.11.98, Москва.
2. Четвертая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. Санкт-Петербург, 1999.
3. Международная научно-техническая конференция «Изоляция-99». 15–18.06.1999, Санкт-Петербург.
4. Девятая Международная конференция «Физика диэлектриков» (Диэлектрики–2000). 17–22.09.2000, Санкт-Петербург.
5. Четвертая Международная конференция по физико-техническим проблемам электротехнических материалов и компонентов (ИСЕМС-2001). 24–27.09.2001, Клязьма.
6. Межвузовская научная конференция «XXX юбилейная неделя науки СПбГТУ». 26.11–01.12.2001, Санкт-Петербург.
7. Третья Международная конференция «Электрическая изоляция–2002» (ICEI–2002). 18–21.06.2002, Санкт-Петербург.
8. Научно-практическая конференция и школа-семинар «Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий». 14–16.06.2003, Санкт-Петербург.
9. VII Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах». 20–21.06.2003, Санкт-Петербург.

Публикации.

Опубликовано 15 печатных работ, из них 13 по теме диссертации.

Структура и объем диссертационной работы.

Работа состоит из списка основных сокращений и обозначений, введения, 3 глав, заключения, списка литературы (214 наименований) и 3 приложений на 26 страницах. Диссертация выполнена на 215 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель диссертационной работы, приведены основные научные и практические результаты исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор работ, отражающих современные представления о методах исследования диэлектрических свойств твердых материалов при высокой температуре в СВЧ-диапазоне. Рассмотрены преимущества и недостатки широкого спектра методов измерений и обоснован выбор метода короткозамкнутой волноводной линии прямоугольного сечения для проведения исследований свойств в широком интервале температур. В частности, детально проанализированы резонансные методы, основанные на измерении изменения параметров резонанса системы при введении образца. Показано, что эта группа методов обладает очень высокой точностью и чувствительностью при исследовании материалов с низким уровнем диэлектрических потерь. Однако начальные условия, предполагающие работу в диапазоне высоких температур, косвенно указывают на неизбежно высокие потери, которые возрастают с ростом температуры. В результате электромагнитная энергия поглощается материалом образца в такой степени, что перестают выполняться условия резонанса и, как следствие, пропадает возможность наблюдать изменения в соответствующих параметрах колебательной системы. Кроме того, эти методы требуют технически сложных подходов к задаче достижения требуемых температур (свыше 1000°C). Эти особенности в совокупности приводят к выводу о малой применимости резонансных методов к поставленной задаче. Аналогичный вывод следует сделать и по методами измерения $\varepsilon^*(t)$ в свободном пространстве – эти методы требуют применения образцов с большой площадью, что затрудняет их равномерный прогрев и ведет к увеличению погрешности измерений.

Далее в первой главе рассматриваются волноводные методы, которые основываются на наблюдении изменения параметров СВЧ-волны в волноводе при помещении в него исследуемого образца. Обладая меньшей точностью и чувствительностью в сравнении с резонансными методами, эта группа методов демонстрирует высокую степень применимости для высокотемпературных измерений. В частности, техническое решение задачи нагрева образца достигается намного более простыми методами – от простого нагрева системы волновод-образец с помощью электрической печи сопротивления до применения нагрева с помощью лазерного излучения с последующим учетом возникающего градиента температур по объему образца. В то время как большинство материалов при нагреве до высоких температур уже выходят из диапазона применимости резонансных методов по параметру потерь, они все еще остаются в пределах допустимого для волноводного метода.

При рассмотрении поведения измерительной системы при нагревании отмечается необходимость учета изменяющегося газового (воздушного) зазора, возникающего вследствие различий коэффициентов термического расширения материалов волновода (благородный /Pt, Pt+Rh/ или тугоплавкий металл /W, Mo/) и образца (диэлектрик). На рис. 1 изображено поперечное сечение прямоугольного волновода с образцом и возникающие в процессе нагрева между ними зазоры, величина которых зависит от t . Вертикальные линии соответствуют вектору напряженности электрического поля \vec{E} . На рис. 2 приведены количественные примеры изменения степени заполнения (отношение b'/b , где b и b' – размеры узкой стенки волновода и образца, соответственно) в зависимости от температуры при условии начального 100%-го заполнения платинового волновода образцами из широко распространенных высокотемпературных диэлектриков, применяемых при высоких температурах в качестве радиопрозрачных материалов.

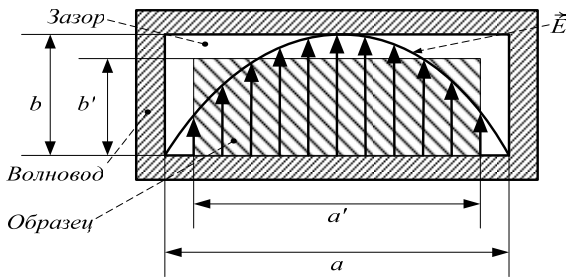


Рис. 1. Взаимная геометрия образца и волновода после нагрева

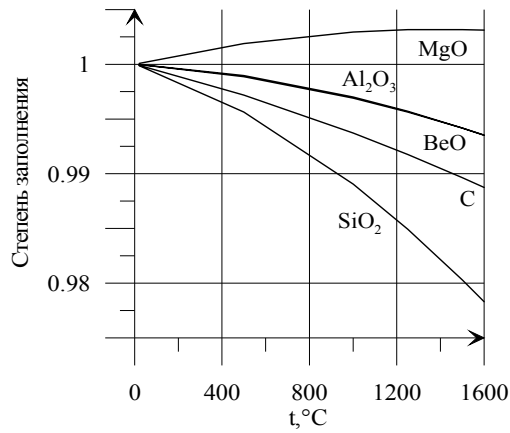


Рис. 2. Изменение степени заполнения Pt волновода от температуры (t , °C)

Как следует из рис. 1, величина вектора \vec{E} по краям внутренней широкой стенки волновода меньше, чем в его центре. Это говорит о том, что, хотя в общем случае необходимо учитывать влияние зазора, как вдоль короткой стенки, так и вдоль широкой, тем не менее вкладом последнего можно пренебречь, так как его влияние будет значительно меньшим.

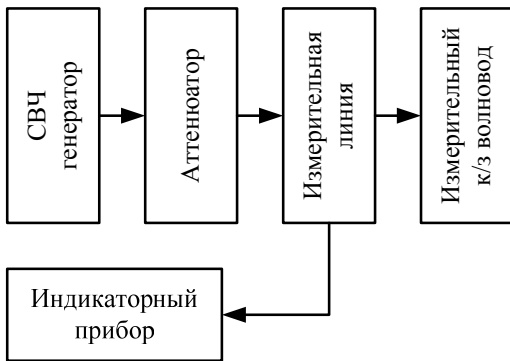


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки

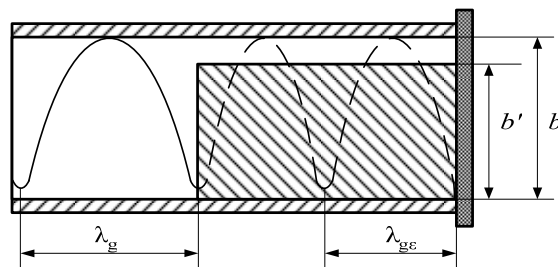


Рис. 4. Эпюра стоячей волны в волноводе после введения образца

Для завершения полной картины методов измерений в первой главе также рассматриваются прочие методы, такие как: измерения в свободном пространстве диэлектрических свойств вращающегося образца, подогреваемого ацетиленовыми горелками; интерферометрические методы; метод падающего нагретого образца; методы одновременного СВЧ-нагрева и измерения ϵ^* и другие. Несмотря на предлагаемые интересные инновационные решения применимость этих методов представляется очень ограниченной как вследствие сравнительно низкой точности, так и по причине механических или кинетических ограничений на анализируемые образцы.

На основании сравнительного анализа положительных и отрицательных сторон всех вышеупомянутых групп методов в работе делается вывод о целесообразности более детальной проработки одного из волноводных методов, блок-схема экспериментальной установки которого и эпюра стоячей волны при заполненном волноводе показаны на рис. 3 и 4, соответственно.

Ключевым моментом волноводного метода является переход от измеренных характеристик волны к параметрам истинной диэлектрической проницаемости и истинного уровня диэлектрических потерь. Отдельный акцент должен быть сделан именно на определении истинных величин, а не измеренных. Однако это сопряжено с решением сложных трансцендентных уравнений. Для решения этой задачи в работе предложено использовать современную цифровую ЭВМ, которая производила бы расчет по специально разработанной программе вычислений.

В завершении первой главы автором делаются выводы, обобщающие обзор методов, и формулируются цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена анализу расчетных уравнений для случая средних потерь в предположении, что в волноводе распространяется волна H_{01} без учета гибридных продольно-магнитных ЛМ-волн, разрешению вычислительных сложностей и описанию дизайна и реализации разработанного программного обеспечения. Анализ вычислительных сложностей разделен по решаемым уравнениям. Первое уравнение вида (1) позволяет вычислить величину измеренной диэлектрической проницаемости (ε'_{meas}) на основании измерения параметров стоячей волны. Второе уравнение вида (2) учитывает поправку на газовый (воздушный) зазор для определения скорректированной величины истинной диэлектрической проницаемости (ε'_{real}).

$$\left. \begin{aligned} \frac{\operatorname{tg}(\beta_{\varepsilon} d_t)}{(\beta_{\varepsilon} d_t)} &= \frac{\lambda_g}{2\pi d_t} \cdot \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda_g} (\Delta l + d_t) \\ \varepsilon'_{meas} &= \frac{\frac{1}{\lambda_{cr}^2} + \left(\frac{\beta_{\varepsilon}}{2\pi}\right)^2}{\frac{1}{\lambda_{cr}^2} + \frac{1}{\lambda_g^2}} \\ \lambda_{cr} &= 2a_t \\ \lambda_g &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cr}}\right)^2}} \\ d_t &= d \cdot (1 + \alpha_s t) \\ a_t &= a \cdot (1 + \alpha_w t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где α_s – линейный коэффициент температурного расширения (ЛКТР) материала образца; α_w – ЛКТР материала волновода; β_{ε} – постоянная распространения волны в диэлектрике; λ – длина волны генератора; λ_{cr} – критическая длина волны для волновода заданной конфигурации; λ_g – длина волны в воздушной части волновода; Δl – смещение минимума стоячей волны после введения образца; a – ширина широкой стенки волновода при комнатной температуре; a_t – ширина широкой стенки волновода при температуре t ; d – толщина образца при комнатной температуре; d_t – толщина образца при температуре t .

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\pi b'_t}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_{meas} - 1} \cdot \operatorname{th} \frac{2\pi}{\lambda} (b_t - b'_t) \sqrt{\varepsilon'_{meas} - 1} &= \frac{\varphi \operatorname{tg} \varphi}{\varepsilon'_{real}} \\ \varphi &= \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_{real} - \varepsilon'_{meas}} b'_t \\ b_t &= b \cdot (1 + \alpha_w t) \\ b'_t &= b' \cdot (1 + \alpha_s t) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где φ – вспомогательная функция; b – длина узкой стенки волновода при комнатной температуре; b_t – длина узкой стенки волновода при температуре t ; b' – длина образца вдоль узкой стенки волновода при комнатной температуре; b'_t – длина образца вдоль узкой стенки волновода при температуре t .

Для каждого из уравнений обосновывается выбор метода решения с учетом периодичности функции тангенса и ее уходом в бесконечность в окрестности асимптот. В работе предлагается аналитическим способом найти положения всех асимптот на заданном интервале поиска и затем поделить его этими асимптотами на подынтервалы (рис. 5). Для каждого подынтервала из области определения функции доказывается сходимость алгоритма численного поиска корня через доказательство монотонности. Вывод производится через нахождение соответствующих производных и анализ их поведения. Особое внимание уделяется вопросам гарантированного нахождения решения с учетом особенностей вычислений на цифровой ЭВМ. Рассматривается случай потери корня из-за ошибок округления и предлагается инновационный метод решения с элементами искусственного интеллекта.

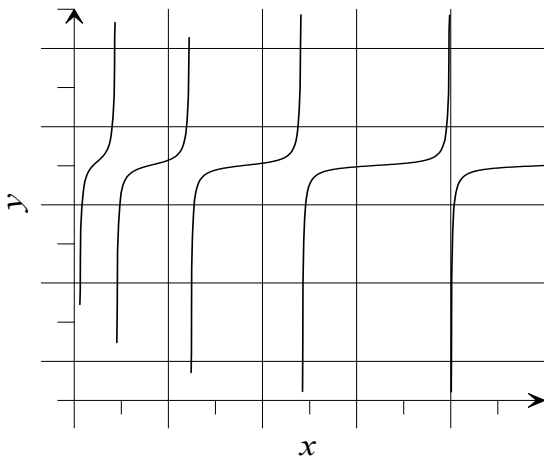


Рис. 5. Примерный вид графика функции для уравнений (1) и (2)

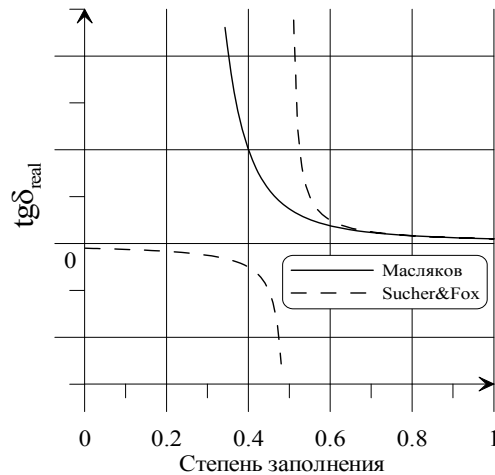


Рис. 6. Сравнение зависимостей для $\operatorname{tg} \delta_{real}$ для выражений Sucher & Fox и Маслякова

Суть предлагаемого инновационного метода заключается в адаптивной выборке границ интервала поиска корня, гарантирующей его существование. Вместо использования рассчитанного положения асимптот, ограничивающих соответствующий подынтервал, вычисляется ширина интервала и его середина. Границы будущего интервала поиска помещаются в середину, а затем в цикле они раздвигаются в направлении соответствующих асимптот до тех пор, пока значения функции в получаемых точках не станут носить разные знаки. Выбрав в качестве начальной величины сдвига четверть длины отрезка, заключенного между асимптотами, и сокращая эту

величину при каждой итерации вдвое, для рассматриваемых функций можно гарантированно найти отрезок, на котором должен существовать один и только один корень.

Определение истинной величины диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta_{\text{real}}$) производится на основании вычисления измеренной величины потерь ($\text{tg}\delta_{\text{meas}}$) по эмпирической формуле, предложенной в работе. Показывается, что известные выражения для учета поправки по $\text{tg}\delta$ не обладают достаточной точностью и при легко достижимых условиях теряют физический смысл (рис. 6). В работе предлагается и обосновывается набор постулатов, из которых выводится соответствующее выражение.

Далее во второй главе анализируются плюсы и минусы различных подходов к реализации программы вычислений. При этом рассматривается широкий спектр решений от использования специализированных математических пакетов (MathCAD, MATLAB) до написания программы на языке высокого уровня типа «C++». Среди критериев участвует немаловажный фактор стоимости как инструментария разработки, так и среды, в которой будет выполняться результат. Сюда входит не только стоимость используемого математического пакета или компилятора языка высокого уровня, но также стоимость операционной системы и минимально необходимой аппаратной конфигурации. На основе детального рассмотрения этих критериев в работе сделан вывод, что наиболее эффективным и экономически оправданным способом реализации является самостоятельное написание программы на языке высокого уровня «C++» на платформе типа Linux. В качестве средств разработки при этом выбираются компилятор GNU CC v2.96, библиотека математических расчетов с произвольной точностью MAPM, а также специализированный текстовый редактор для программистов NEdit v5.4.

Последняя часть второй главы посвящена процессу разработки программы расчетов и проведению с ее помощью компьютерного моделирования эксперимента для различных комбинаций материалов волновода и образца при различных степенях заполнения. Разработка программы состояла из создания прототипа, предназначенного для грубого определения целесообразности такой реализации, и последующего дизайна иерархии классов и взаимосвязей между ними.

Для проверки корректности работы прототипа были произведены несколько трудоемких и длительных (часы) ручных расчетов, по промежуточным и конечным результатам которых производилась отладка. В последствии прототип использовался для проверки корректности расчетов новой объектно-ориентированной (ОО) версии программы. Применение модульной ОО концепции позволило радикально повысить точность вычислений за счет адаптации интерфейса библиотеки математических расчетов с произвольной точностью (MAPM), написанной на языке «C++», для применения в расчетной части разработанного программного обеспечения (ПО).

Результаты моделирования поведения системы с помощью созданного ПО для измерений на частоте 9.4 ГГц в прямоугольном волноводе сечением 23x10 мм для образцов из Al_2O_3 , SiO_2 , C (в виде алмаза), MgO, BeO, а также двух керамик с $\epsilon' = 40$ и 100 при степени заполнения от 0 до 100% проиллюстрированы на рис. 7. На нем показана величина относительной погрешности определения ϵ' в зависимости от степени заполнения для упомянутых материалов. Величина $\text{tg}\delta_{\text{real}}$ оценивалась на основании расчета $\text{tg}\delta_{\text{meas}}$ с последующей корректировкой по формуле, предложенной в работе.

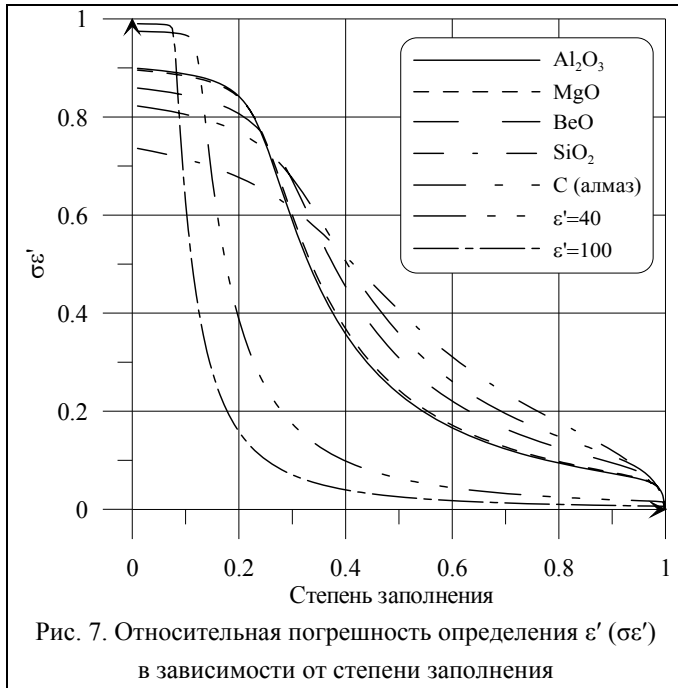


Рис. 7. Относительная погрешность определения ϵ' ($\sigma\epsilon'$) в зависимости от степени заполнения

Как можно отметить из приведенных результатов моделирования, величина ошибки в определении ϵ' уменьшается по мере роста степени заполнения. В работе показано, что, несмотря на то, что при измерениях при высокой температуре величина газового (воздушного) зазора определяется линейными коэффициентами термического расширения материалов волновода и образца, не учтенная поправка может привести к неправильному функционированию конечного изделия. При этом следует учесть также, что на величину $\epsilon^*_{\text{meas}}(t)$ оказывает свое влияние не только термическое расширение материалов волновода и твердого

диэлектрика, но и температурная зависимость $\epsilon^*_{\text{real}}(t)$, определяемая при высоких температурах потерями проводимости.

В третьей главе описываются методика проведения эксперимента, различные варианты обработки измеренных величин, а также анализируются и обсуждаются основные экспериментальные результаты.

Первая часть третьей главы детально описывает виды образцов, которые могут быть использованы для измерений волноводным методом при высокой температуре. В частности, указывается, что геометрическая форма сечения измерительного волновода диктует форму образцов, которая должна быть как можно ближе к форме прямоугольных параллелепипедов. Отклонения от заданной формы, вызванные качеством обработки поверхности или неточностью выдержки заданных прямых углов, могут привести к значительным расхождениям результатов измерения с практикой. В случае измерения свойств анизотропных материалов или обладающих ориентированной структурой указывается на необходимость соблюдать направления граней по отношению к преобладающему направлению в структуре образца. Исследовавшиеся в работе материалы (полиметилметакрилат и кварцевое стекло марки КВ) являются изотропными, поэтому они не требуют соблюдения ориентации образца. В работе также приводится рекомендация по минимизации влияния качества обработки поверхности на результаты измерений. Однако при этом указываются возможные ограничения такого метода.

В представляемой работе производились эксперименты с образцами различных геометрических размеров, изготовленных из полиметилметакрилата (ПММА), кварцевого стекла марки КВ, а также титаносодержащей керамики с относительной диэлектрической проницаемостью 40 и 100. Использование образцов из кварцевого стекла марки КВ было ценно с точки зрения проверки всей системы измерений и последующих вычислений, так как величина

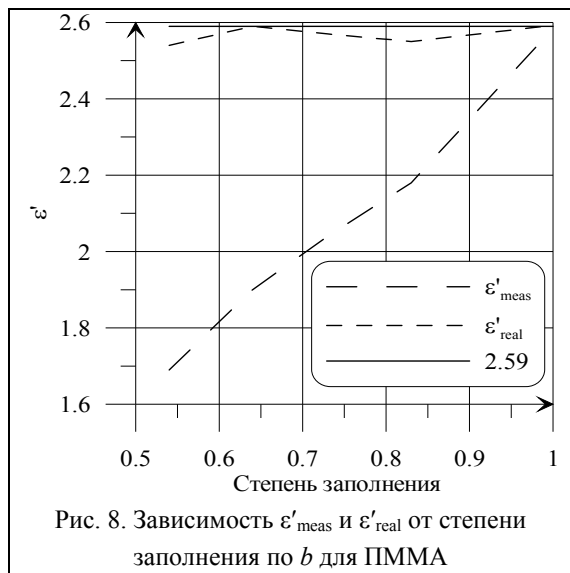
относительной диэлектрической проницаемости для кварцевого стекла марки КВ известна в широком диапазоне частот и ее значение является эталонным.

Все исследуемые образцы имели форму близкую к прямоугольным параллелепипедам, но обладали различными размерами узкой стенки b' . Некоторые из образцов занимали сечение волновода целиком ($b-b'=0$), а некоторые заполняли его частично вдоль узкой стенки волновода ($b-b'>0$). Образцы второго типа позволяли симитировать случай измерений при высокой температуре, который важен для рассматриваемой работы с точки зрения взаимного изменения геометрии волновода и образца и возникающей из-за этого разницы в степени заполнения. Эксперименты проводились в широком диапазоне степени заполнения (b'/b) вдоль узкой стенки волновода от примерно 32% до 100%. При этом для достижения наибольшего разнообразия этой величины, второй набор из кварцевого стекла был использован дважды — один раз в положении, когда величина толщины образца (d) была наибольшей, а затем образцы были повернуты на 90 градусов вокруг широкой стороны волновода, что позволило получить повышенную степень заполнения, но уменьшило толщину образцов. Фактически производилась взаимная замена размерностей b и d .

В работе также рассматривалась возможность проведения экспериментов с материалами с высоким значением СВЧ диэлектрической проницаемости ($\epsilon'=40$ и 100). К сожалению, было невозможно получить монолитные образцы таких веществ, и была предпринята попытка заменить их наборами из плоскопараллельных пластинок толщиной порядка 1 мм из соответствующей керамики. Образцы были получены в ОАО «НИИ «Гириконд» (Санкт-Петербург). Использовалась СВЧ керамика на основе оксидов Ва, La и Ti с добавлением оксидов Bi, Mg, Nb.

Вторая часть третьей главы детально описывает экспериментальную установку, как в целом, так и по отдельным компонентам, в состав которых входят генератор СВЧ (Г4-109), поляризационный волноводный аттенюатор (ДЗ-34А), измерительная линия (Р1-20), измеритель отношения напряжений (В8-7), а также короткозамкнутый измерительный волновод сечением 23x10 мм. Измерения производились на фиксированной частоте 9.4 ГГц.

Далее в третьей главе рассматривается порядок автоматизированного расчета с применением программы, разработанной в рамках настоящей диссертационной работы. Фактически эта часть является руководством пользователя по применению соответствующего программного обеспечения. Также в этой части приводится статистическая информация о среднем времени выполнения расчетов (примерно 1 минута с учетом времени на ввод данных) в сравнении с ручным методом (примерно 90 минут). Кроме того, приводится оценка влияния ускорения расчетов на время полного цикла измерений, значительную часть которого ранее составлял именно расчет графическими или табличными методами.



Последняя часть третьей главы представляет результаты измерений для упомянутых ранее образцов, а также анализ достоверности и воспроизводимости результатов. В частности, для образцов из ПММА были получены результаты, представленные на рис. 8. На этом графике, показаны три линии. Верхняя прямая соответствует справочному значению диэлектрической проницаемости ($\epsilon' = 2.59$) ПММА. Другие две линии соответствуют величинам измеренной (ϵ'_{meas}) и истинной (ϵ'_{real}) проницаемости рассматриваемого материала. Чем ближе значение ϵ'_{real} или ϵ'_{meas} к верхней прямой, тем более точным являлся расчет этой величины. Как видно из графиков,

нескорректированная величина ϵ'_{meas} дает заниженное значение, в то время как рассчитываемая с учетом поправки на зазор ϵ'_{real} значительно приближается к истинному справочному значению. Таким образом, предлагаемая методика обработки результатов измерений позволяет достичь повышенной точности, что, несомненно, должно сказаться на качестве изделий, использующих результаты рассматриваемых измерений.

Достоверность результатов измерений и расчетов демонстрируется в работе на примере эталонного материала – кварцевого стекла марки КВ. Для нескольких произвольно выбранных образцов был выполнен полный цикл измерений и последующей вычислительной обработки. Полученный результат по ϵ'_{real} усреднялся и его величина (3.806) полностью соответствует данным, приводимым в Таблицах стандартных справочных данных ГСССД 33-82, изданных Госстандартом, согласно которым в диапазоне $10^{-1} \div 10^{11}$ Гц при 293 К диэлектрическая проницаемость этой марки кварцевого стекла равна 3.809 ± 0.003 .

Воспроизводимость результатов была показана на примере другой группы образцов из кварцевого стекла марки КВ. Для нескольких образцов производился полный цикл измерений, включая расчет ϵ'_{real} . Затем для каждого из случаев рассчитывалась величина относительной погрешности и было показано, что в среднем погрешность не выходит за пределы 0.08% от эталонного значения. Это дает основание сделать вывод об удовлетворительной воспроизводимости результатов, полученных с помощью измерительной установки, использовавшейся в работе.

Основные выводы и результаты работы.

1. Разработан оптимизированный метод решения трансцендентных уравнений, позволяющий учесть влияние температурно-обусловленного газового (воздушного) зазора между исследуемым твердым диэлектриком и металлическим волноводом на результаты определения диэлектрических свойств твердых диэлектриков волноводным методом.
2. Предложен инновационный адаптивный вариант метода дихотомии для численного решения трансцендентных уравнений специального вида.

3. Создан комплекс программного обеспечения, позволивший компьютеризировать процесс обработки результатов измерений волноводным методом. На разных стадиях разработки использовались языки C, C++, Perl. Объем ядра вычислений составляет 1400 строк кода на языке C++ при использовании компьютерных библиотек STL и MAPM.
4. Впервые произведено компьютерное моделирование влияния температурно-обусловленного газового (воздушного) зазора на результаты измерений диэлектрических свойств твердых материалов волноводным методом.
5. Использование разработанного многоплатформенного комплекса программного обеспечения позволило сократить время необходимое для расчетов по результатам одного эксперимента примерно в 100 раз (с ~90 минут до ~1 минуты с учетом времени, затрачиваемого на ввод первичной экспериментальной информации в ЭВМ).
6. Установлено, что величина теплового зазора значительно влияет на результаты измерений свойств диэлектриков волноводным методом. В частности, для кварцевого стекла марки КВ, используемого в качестве эталонного материала для поверки отечественных и зарубежных диэлектрометров, измеренная величина относительной диэлектрической проницаемости почти линейно уменьшается с увеличением зазора.
7. Выявлено, что проанализированные и запрограммированные корректирующие уравнения для учета влияния температурно-обусловленного газового (воздушного) зазора, выведенные из начального предположения о распространении волны H_{01} , склонны давать возрастающую ошибку по мере роста ϵ' и величины зазора, что объясняется ростом влияния в указанных условиях гибридных продольно-магнитных LM-волн.
8. Предложена и обоснована система критериев, на основании которых выведена новая эмпирическая формула для учета поправки на зазор для величины $\text{tg}\delta$. Расчет соответствующей величины включен в разработанное программное обеспечение.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Полонский Ю.А., Масляков С.А. Электроизоляционная кварцевая керамика и контроль ее свойств в диапазоне сверхвысоких частот / Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии – 98» (НМТ-98). 17-18.11.98, Москва. М.: МАТИ, 1998. – С. 51-52.
2. Масляков С.А., Полонский Ю.А. Численное решение трансцендентных уравнений в задаче расчета свойств электроизоляционной кварцевой керамики / Тезисы докладов Четвертой Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов. Санкт-Петербург, 1999. – С. 51.
3. Полонский Ю.А., Масляков С.А. Влияние степени заполнения волновода образцом на результаты исследований диэлектриков волноводным методом в диапазоне СВЧ в интервале $20 \div 1500^\circ\text{C}$ / Труды Международной научно-технической конференции «Изоляция-99». 15-18.06.1999, Санкт-Петербург. СПб.: СПбГТУ, 1999. – С. 39-41.
4. Maslyakov S.A., Polonsky Yu.A. Computational difficulties in the problem of determination of the microwave properties of dielectrics at high temperature / Тезисы докладов 9 Международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики-2000). 17-22.09.2000, Санкт-Петербург. СПб.: РГПУ, 2000. Т. 2. – С. 98-99.

5. Масляков С.А., Полонский Ю.А. К вопросу применения волноводного метода для исследования СВЧ-диэлектриков при высоких температурах / Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2000. № 4. – С. 80-84.
6. Масляков С.А. Особенности использования ЭВМ в задаче исследования СВЧ свойств диэлектриков волноводным методом при высокой температуре / Труды Международной конференции по физико-техническим проблемам электротехнических материалов и компонентов (ISEMC-2001). 24-27.09.2001, Клязьма. М.: ИЭ МЭИ, 2001. – С. 61-62.
7. Манько Н.В., Полонский Ю.А., Масляков С.А. Влияние степени заполнения волновода диэлектриком на результаты измерений СВЧ диэлектрической проницаемости / Материалы межвузовской научной конференции «XXX юбилейная неделя науки СПбГТУ». 26.11-01.12.2001, Санкт-Петербург. Ч. 2. СПб.: СПбГТУ, 2002. – С. 14-15.
8. Масляков С.А., Полонский Ю.А. Software Design for the Problem of Determination of Microwave Properties of Solids at High Temperature / Труды 3 Международной конференции «Электрическая изоляция-2002» (ICEI 2002). 18-21.06.2002, Санкт-Петербург. СПб.: Нестор, 2002. – С. 83-87.
9. Масляков С.А., Полонский Ю.А. Инновационное использование адаптивных алгоритмов в вычислительной части задачи определения свойств диэлектриков волноводным методом / Материалы научно-практической конференции и школы-семинара «Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий». 14-16.06.2003, Санкт-Петербург. СПб.: СПбГПУ, 2003. – С. 154-159.
10. Масляков С.А. Методика гарантированного нахождения решения уравнения в задаче определения свойств диэлектриков волноводным методом / Материалы VII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах». 20-21.06.2003, Санкт-Петербург. СПб.: СПбГПУ, 2003. – С. 85-86.
11. Манько Н.В., Полонский Ю.А., Масляков С.А. Влияние воздушного зазора на результаты измерений СВЧ диэлектрических свойств твердых диэлектриков волноводным методом / Материалы межвузовской научной конференции «XXXII неделя науки СПбГПУ». 24-29.11.2003, Санкт-Петербург. Ч. 2. СПб.: СПбГПУ, 2004. – С. 46-47.
12. Масляков С.А., Полонский Ю.А. Компьютерное моделирование влияния температурно-обусловленного зазора на измерения свойств твердых СВЧ-диэлектриков волноводным методом / Тезисы докладов 10 Международной конференции «Физика диэлектриков-2004» (ICD 2004). 23-27.05.2004, Санкт-Петербург. СПб.: РГПУ, 2004. – С. 361-366.
13. Полонский Ю.А., Масляков С.А. Компьютерный расчет диэлектрической проницаемости материалов при измерениях волноводным методом в диапазоне СВЧ / Электротехника. 2005. № 3. – С. 30-34.