

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПЕНОМАТЕРИАЛА КВАЗИОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В.И. Суслев, О.В. Казьмина, Б.С. Семухин, Ю.П. Землянухин, К.В. Дорожкин

Дано описание двух методик измерения коэффициентов прохождения и отражения от плоских образцов стеклокристаллического пеноматериала в диапазонах частот 26–40 ГГц и 170–230 ГГц. Полученные результаты показывают, что исследуемый материал активно взаимодействует с электромагнитным излучением этих диапазонов. Достоверность результатов подтверждена сходимостью результатов, полученных двумя методами

Ключевые слова: квазиоптический метод, электромагнитный отклик, диэлектрическая проницаемость, точность измерений квазиоптический метод, электромагнитный отклик, диэлектрическая проницаемость, точность измерений

Введение

При исследовании электромагнитных свойств и измерения магнитной и диэлектрической проницаемости листовых материалов, перспективным является квазиоптический метод. Свободное пространство между элементами измерительной ячейки позволяет проводить контроль различных параметров изделий без их повреждения во время технологического процесса производства. Квазиоптический метод основан на связи измеряемых комплексных коэффициентов отражения (R) и прохождения (T) с электромагнитными и геометрическими параметрами исследуемого образца. Величины модулей и фаз коэффициентов зависят от толщины слоя магнитодиэлектрика (d) и значений комплексных диэлектрической $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ и магнитной $\mu = \mu' - i\mu''$ проницаемостей.

Цель данной работы – провести измерения электромагнитного отклика от плоских образцов стеклокристаллического пеноматериала (ПСК) на двух установках в различных диапазонах частот и сравнить полученные результаты в полосах частот 26–40 ГГц и 170–230 ГГц.

Стеклокристаллический пеноматериал представляет собой пористый неорганический материал, получаемый путем термообработки ($\sim 800 - 850^\circ\text{C}$) аморфной матрицы, содержащей кристаллическую фазу в виде SiO_2 в количестве от 5 до (максимум) 25 мас.% и размером частиц менее 1 мкм. ПСК является аналогом традиционного пеностекла, распространенная технология производства которого основана на использовании стеклобоя листовых и тарных стекол или стеклогранулята аналогичных составов, обладающих низкой кристаллизационной способностью [1].

Описание измерительных установок

При проведении исследований в диапазоне частот 26–40 ГГц использован квазиоптический метод измерения на основе векторного анализатора цепей Agilent E8363B, где в качестве приемопередающих элементов использовались рупорные антенны. Исследуемый образец устанавливается между сдвинутыми рупорами. Проведенное измерение диэлектрической проницаемости различных образцов в диапазоне частот 26 – 40 ГГц показало, что такой метод измерения дает ошибочный результат [2]. Увеличением расстояния между рупорами при симметричном по отношению к ним расположении образца удалось добиться значительно лучших результатов. Однако при этом существенно снизился уровень фиксируемого приемным рупором сигнала. Для устранения этого недостатка нами использованы квазиоптические линзы, которые были установлены рядом с приемным и передающим рупорами. Благодаря введению линз с фокусным расстоянием 120 мм удалось повысить уровень сигнала на 30 дБ по сравнению с прямым измерением (без линз). Для исследования образцов, диаметр которых составляет 50 мм и более, использовалась диафрагма, изготовленная из поглощающего материала с круглым отверстием диаметром 45 мм. Для измерения электромагнитных параметров материалов с размерами менее 50 мм, для устранения дифракционных эффектов, использовалась другая диафрагма с отверстием диаметром 20 мм. Проведенные исследования материалов с большими диэлектрическими потерями [3, 4] показали, что падающей на образец мощности при такой конфигурации установки недостаточно. Для концентрации

РАЗДЕЛ V. ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

микроволновой мощности на образце нами добавлены еще две линзы с фокусным расстоянием 60 мм [5].

Блок-схема установки представлена на рисунке 1.

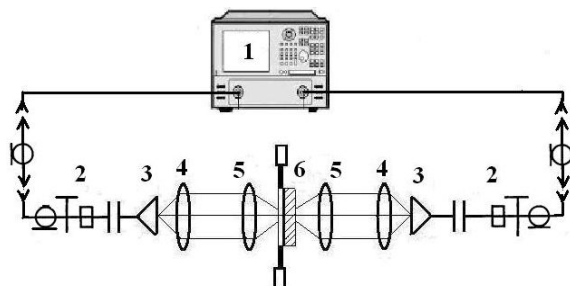


Рисунок 1 - Блок-схема квазиоптической установки на основе векторного анализатора цепей.

В установке задействованы следующие элементы: 1 – векторный анализатор цепей E8363B фирмы Agilent Technologies; 2 – коаксиально-волноводный переход; 3 – рупорные преобразователи; 4 – линзы с фокусным расстоянием 120 мм; 5 – линзы с фокусным расстоянием 60 мм; 6 – держатель образца с образцом.

Элементы высокочастотного тракта размещаются на оптической скамье и жестко закрепляются после проведения юстировочных работ. Векторный анализатор цепей калибровался на диапазон частот 26 – 40 ГГц с разрешением 1601 точка.

Измерения в диапазоне частот 170-230 ГГц проводились при помощи субмиллиметрового спектрометра ИМЦ ТД-01. В качестве источника излучения использовалась ЛОВ QS-1500 №8217 ИМЦ ТД-01. Для измерения коэффициента прохождения используется схема, представленная на рисунке 2.

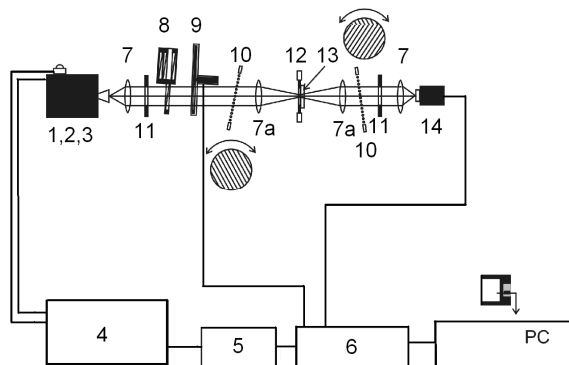


Рисунок 2 - Блок-схема субмиллиметрового спектрометра ИМЦ ТД-01 при измерении коэффициента прохождения.

Монохроматическая волна генерируется набором ламп обратной волны, которые обозначены цифрами 1,2,3. Источник электро-

магнитного излучения управляется блоком питания 4, который посредством блока преобразования 5 соединяется с блоком управления 6, который, в свою очередь управляется персональным компьютером PC по заданной программе. В блоке управления происходит преобразование принятого сигнала с оптико-акустического преобразователя 14. Микроволновое излучение собирается линзой 7 и поступает на механический модулятор 9 через поляризатор 11. Для ступенчатой регулировки уровня сигнала предусмотрен аттенюатор 8. Сигнал поступает на держатель образца 12, который представляет собой пластину поглощающего материала с отверстием через которое электромагнитное излучение поступает на исследуемый образец. Наличие поглощающей пластины позволяет проводить измерения на образцах малых размеров, не допуская дифракционного эффекта, существенно снижающего точность измерения. Плавное изменение падающей мощности на образец и на детектор осуществляется поворотом полупрозрачных зеркал 10, которые играют роль делителей мощности.

При измерении коэффициентов отражения и прохождения и, при необходимости, вычисления комплексных значений диэлектрической проницаемостей проводится два измерения: одно калибровочное при отсутствии образца в тракте, второе – с образцом. Калибровочное измерение учитывает величину прошедшей мощности во всем рабочем диапазоне выбранной лампы обратной волны. Форма частотной зависимости генерируемой мощности задается паспортом на ЛОВ, который поставляется производителем терагерцового спектрометра.

Схема измерения коэффициента отражения приведена на рисунке 3.

Коэффициент отражения измеряется следующим образом. Излучение ЛОВ, сфокусированное магнитной системой, коллимируется в плоскопараллельный пучок линзой 4, проходит через поляризатор 5 и аттенюатор 6 на делитель мощности 8. Неиспользуемая часть мощности отражается делителем 8 на согласованную нагрузку 7 и поглощается. Излучение, прошедшее через делитель фокусируется параболическим зеркалом 13 отражательного блока на отверстии держателя образца 14. Модуляция электромагнитного сигнала осуществляется механическим модулятором 9. Для калибровки измерительной установки используется эталонное зеркало, которое входит в комплект спектрометра.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ СТЕЛКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПЕНОМАТЕРИАЛА КВАЗИОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

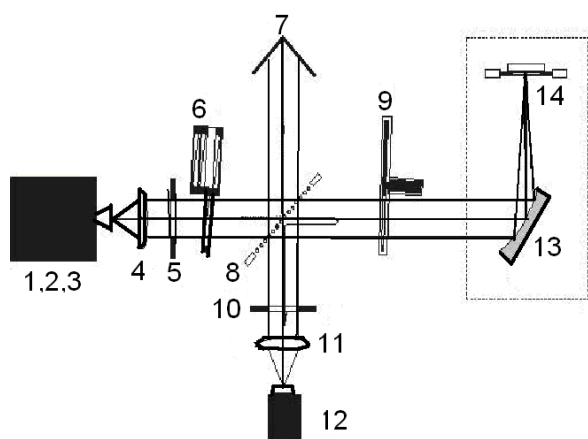


Рисунок 3 - Блок схема субмиллиметрового спектрометра ИМЦ ТД-01 при измерении коэффициента отражения.

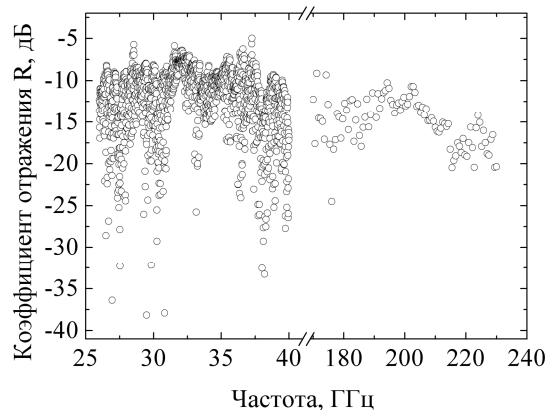
Отраженное от образца (или от эталонного зеркала) излучение проходя через делитель 8 фокусируется другой линзой 11 на входном окне оптико-акустического преобразователя 12. Значение коэффициента отражения определяется как отношение мощности поступающей на детектор при нахождении образца в держателе, к мощности на детекторе, когда образец отсутствует в тракте и отражение происходит от эталонного металлического зеркала.

Экспериментальные результаты

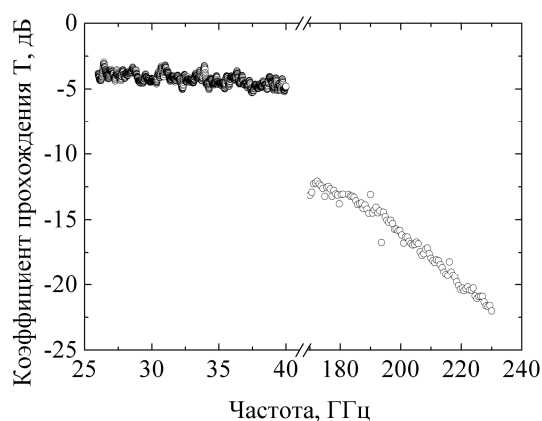
Достоверность получаемых на спектрометре экспериментальных результатов оценивалась измерением коэффициента отражения от образцов, имеющих статус стандартных образцов предприятия. При этом решалась прямая электродинамическая задача определения составляющих электромагнитного отклика при известных значениях диэлектрической проницаемости. После предварительного исследования различных образцов ПСК, для дальнейших измерений были выбраны два из них, электромагнитные параметры которых представляют наибольший интерес. Полученные результаты измерений представлены на рисунках 4 (а,б) и 5 (а,б).

Из полученных результатов видно, что в диапазоне 26-40 ГГц коэффициенты прохождения обоих образцов имеют почти равномерное распределение, в диапазоне 170-230 ГГц наблюдается значительное снижение. Кроме того на рисунке 5а присутствует значительный разрыв между коэффициентами прохождения на частоте 40ГГц и 170ГГц, что можно объяснить постепенным снижением

величин комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 40-170ГГц.



а



б

Рисунок 4 - Спектры коэффициента прохождения (а) и отражения (б) для образца ПКСМ ШО-1

Коэффициенты отражения для обоих образцов имеют сопоставимые значения.

Выводы

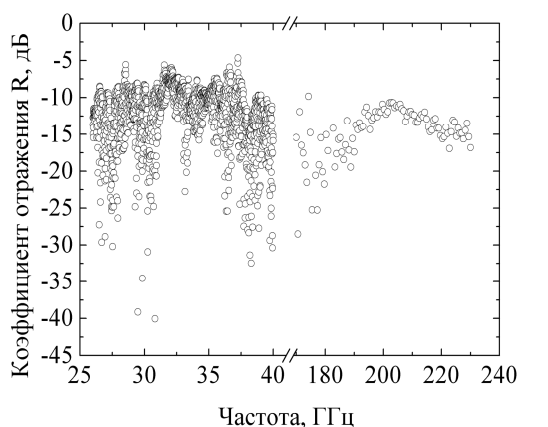
Сравнение данных, полученных на различных измерительных установках, показало согласующиеся результаты коэффициентов прохождения и отражения, что в свою очередь значительно увеличивает точность определения электромагнитных параметров материалов.

Следует отметить высокий уровень поглощения, которым отличаются исследуемые материалы. Это говорит о том, что структура, т.е. размеры, форма, однородность распределения пор, а также толщина межпоровой перегородки и состав аморфной составляющей определяют не только механические свойства пористых материалов, аналогичных

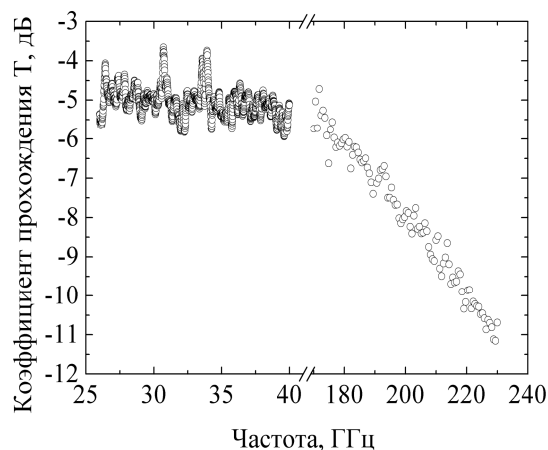
РАЗДЕЛ V. ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

пеностеклу, но и степень активность взаимодействия с электромагнитным излучением.

Таким образом показано, что стеклокристаллический пеноматериал может быть использован в качестве строительного материала, обладающего уникальными свойствами. Например, его можно использовать для преобразования электромагнитной энергии высокой частоты в тепло и применять для обогрева помещений, построенных из этого материала.



а



б

Рисунок 5 - Спектры коэффициента прохождения (а) и отражения (б) для образца ПКСМ ШД-1

Этот материал, сочетая относительно высокую прочность и технологичность изготовления с уникальными электромагнитными свойствами может найти ряд других применений не только в строительстве, но в других областях науки и техники, например, в радиоэлектронике высоких частот.

Проведенные исследования показали перспективность разработки стеклокристаллического пеноматериала и необходимость продолжения исследований с целью улучшения прочностных и электродинамических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казьмина О.В. Влияние кристаллической фазы межпоровой перегородки на прочность стеклокристаллического пеноматериала / О.В. Казьмина, В.И. Верещагин, Б.С. Семухин, А.В. Мухортова, Н.А. Кузнецова // Известия Вузов. Физика, 2011.– т.54. – №1. – С.92 – 93.
2. Казьмина О.В., Верещагин В.И., Абияка А.Н. Оценка составов и компонентов для получения пеностеклокристаллических материалов на основе алюмосиликатного сырья // Стекло и керамика. 2009. № 3. С. 6–8.
3. Казьмина О.В., Верещагин В.И. Семухин Б.С. Структура и прочность пеностеклокристаллического материала из низкотемпературного стеклогранулята // Физика и химия стекла. 2011. Т.37, № 4, с. 29–36.
4. Суслев В.И. Рупорный метод измерения электромагнитного отклика от плоских образцов в диапазоне частот 26–37,5 ГГц с улучшенными метрологическими характеристиками / В.И. Суслев, В.А. Журавлев, Е.Ю. Коровин, Ю.П. Землянухин // Доклады ТУСУРа, 2011. - № 2 (24), часть 1. – С.227-231.
5. Mazov I.N. Electrophysical and electromagnetic properties of pure MWNTs and MWNT/PMMA composite materials depending on their structure / I.N. Mazov, V.L. Kuznetsov, S.I. Moseenkov, A.V. Ishchenko, A.I. Romanenko, O.B. Anikeeva, T.I. Buryakov, E.Yu. Korovin, V.A. Zhuravlev, V.I. Suslyayev // Fullerenes, nanotubes and carbon nanostructures. – 2010. – V. 18. – P. 505 – 515.
6. Журавлев В.А. Динамические магнитные характеристики композиционного полимерного материала на основе карбонильного железа / В.А. Журавлев, В.И. Суслев, Е.Ю. Коровин // Известия Вузов. Физика, 2010.– т.53. - №5. – С.97-98.
7. Журавлев В.А. Повышение чувствительности и точности квазиоптических методов измерения электромагнитного отклика в миллиметровом диапазоне длин волн / В.А. Журавлев, В.И. Суслев, Ю.П. Землянухин // Известия Вузов. Физика, 2011.– т.54. – №7. – С.92 – 93.

К.ф.-м.н., доцент **В.И. Суслев** – susl@mail.tsu.ru, аспирант **Ю.П. Землянухин** – ypz@mf.tsu.ru, магистрант **К.В. Дорожкин** – km007@sibmail.com – Национальный исследовательский Томский государственный университет, (3822) 413964; д.х.н., проф. **О.В. Казьмина** – kazmina@tpu.ru, д.т.н., ведущий н.с. **Б.С. Семухин** – bss@ispms.tsc.ru – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, (3822) 563169