

Применение СВЧ измерений в археологических исследованиях

Д.А. Полетаев¹, А.А. Нудьга¹, Б.В. Соколенко¹, К.С. Мальцев¹, В.В. Майко², В.П. Власов²

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского

²Институт археологии Крыма РАН

Аннотация: в данной работе рассматривается конструкция коаксиального резонансного измерительного преобразователя с укорачивающей емкостью, применяемого для определения электрофизических параметров составных элементов археологических объектов. На основании численной модели определены оптимальные геометрические размеры резонансного датчика. Проведен анализ основных характеристик измерительного преобразователя. Получен ряд экспериментальных данных, подтверждающих применимость предложенной методики.

Ключевые слова: археологический объект, СВЧ резонатор, резонансный измерительный преобразователь, апертура, характеристики преобразования

1. Введение

Предметы, найденные в культурном слое: керамическую посуду, металлические изделия, черепицу, деревянные элементы и др., относят к археологическим объектам. Неэлектрические находки представляют, в большинстве своем, цельные структуры [1, 2]. Керамические и другие диэлектрические объекты, ввиду хрупкости, чаще всего представлены отдельными составными элементами. Сортировка данных многочисленных кусочков для восстановления целого объекта является весьма трудоемкой задачей [1, 2]. Отбор отдельных кусочков, осуществляемый по внешним характеристикам на глаз, может занимать несколько лет. Данная задача может быть автоматизирована с применением систем распознавания объектов (нейронных сетей). Однако необходимость всестороннего сканирования каждого элемента является не менее сложной задачей, решение которой при условии разнообразия форм отдельных элементов весьма трудоемко. Методы СВЧ диагностики, представленные широким спектром ближнеполевых и диэлькометрических установок, чрезвычайно удобны для применения в сортировке элементов археологических объектов.

Основным функциональным узлом аппаратуры для СВЧ диагностики материалов является датчик, который включает источник электромагнитных волн, измерительный преобразователь (ИП) и устройства выделения информационных сигналов. Наибольшее распространение получили датчики на основе резонаторов [3 – 10]. При этом, для обеспечения бесконтактности проведения экспресс-измерений, электромагнитное поле резонатора зондирует образец через отверстие в одной из стенок. Такой резонансный измерительный преобразователь (РИП) относится к апертурному типу [10].

В работах экспериментального и теоретического характера исследуется применение резонаторных измерительных преобразователей для измерения электрофизических параметров объектов [5 – 10]. Однако в этих работах не уделяется должного внимания оптимизации чувствительности датчика для различных керамик, составляющих большую часть археологических находок. Теоретическое обоснование выбора параметров РИП базируются на упрощенных моделях, позволяющих учитывать только колебательные потери в резонаторной системе. Современные прямые численные методы позволяют существенно уточнить модель РИП КИА, то

есть учесть геометрию апертуры, расположение, размеры и другие характеристики исследуемого объекта и построить оценочные теоретические характеристики преобразования РИП КИА, связывающие информационные сигналы резонаторного измерительного преобразователя с электрофизическими параметрами исследуемого объекта [10].

Целью работы является оптимизация параметров РИП КИА, применяемого для сортировки диэлектрических элементов археологических объектов, а также предложение методики работы с разработкой.

2. Подготовка эксперимента и результаты

На рисунке 1 показана конструкция рассматриваемого РИП КИА с прилегающим объектом.

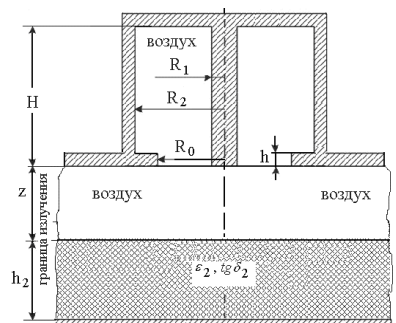


Рисунок 1. Модель РИП КИА

Модель включает отрезок коаксиального волновода, образец толщиной h_2 с электрофизическими параметрами $\varepsilon_2, tg\delta_2$.

Для проведения практических измерений важно, чтобы электрофизические параметры образца оказывали как можно большее влияние на нагруженную добротность РИП. При этом нагруженная добротность не должна быть меньше 100 [10]. Из теории коаксиальных линий передач [4] известно, что минимальный коэффициент затухания в коаксиальной линии достигается при отношении радиусов: $R_1 / R_2 = 0,28$. Очевидно, максимальная добротность четвертьволнового резонатора будет также достигаться при данном отношении.

Из общих физических представлений следует, что выбором радиуса R_0 апертуры можно существенно изменять добротность резонаторного измерительного преобразователя.

В результате численного моделирования рассчитаны оптимальные (с точки зрения чувствительности и добротности РИП) геометрические размеры резонатора РИП: $H / \lambda = 1,25$; $R_2 / \lambda = 0,17$; $z = 0$; $h_{21} = 0$; $h_2 / \lambda = 0,14$; $h / H = 0,01$; проводимость стенок $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$ См/м; $\lambda = 3$ см. Изготовлен прототип резонансного измерительного преобразователя, согласно оптимизированной геометрии (материал – сталь с нанесенным медным покрытием, толщиной больше скин-слоя на рабочей частоте). В качестве измерительного устройства применялся векторный анализатор цепей P4226 со стандартной схемой подключения анализируемого устройства – резонатора. В качестве археологических объектов применялись элементы черепицы и лепной керамики из городища «Таш-Джарган» (координаты расположения: Республика Крым, Симферопольский район, Чистенское сельское поселение, село Чистенькое). Элементы археологических объектов представляли собой кусочки керамики с приблизительными размерами: 1 см x 1 см x 1 см, практически идентичные визуально. Количество элементов: по 5 штук каждого типа (5 элементов черепицы, 5

керамических элементов, классифицированных по типам сторонними методами). В процессе измерения электрофизических параметров диэлектриков выявлено, что достаточно измерять добротность и частоту резонансного измерительного преобразователя, как характерные параметры, характеризующие конкретный объект и его принадлежность.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. Для рассматриваемого элемента археологического объекта в нескольких точках его поверхности измерялись информационные параметры (добротность и частота) резонансного измерительного преобразователя, затем полученные параметры усреднялись. Аналогичные действия производились для каждого исследуемого элемента. По результатам измерений информационных параметров резонансного измерительного преобразователя элементы археологических объектов разделялись по группам со сходными значениями.

На рисунке 2 представлены полученные в ходе эксперимента значения резонансных частот резонансного преобразователя, соответствующие исследованию различных элементов археологических объектов, разделенных на две группы сторонними методами. Точками на рисунке отмечены значения информационных параметров.

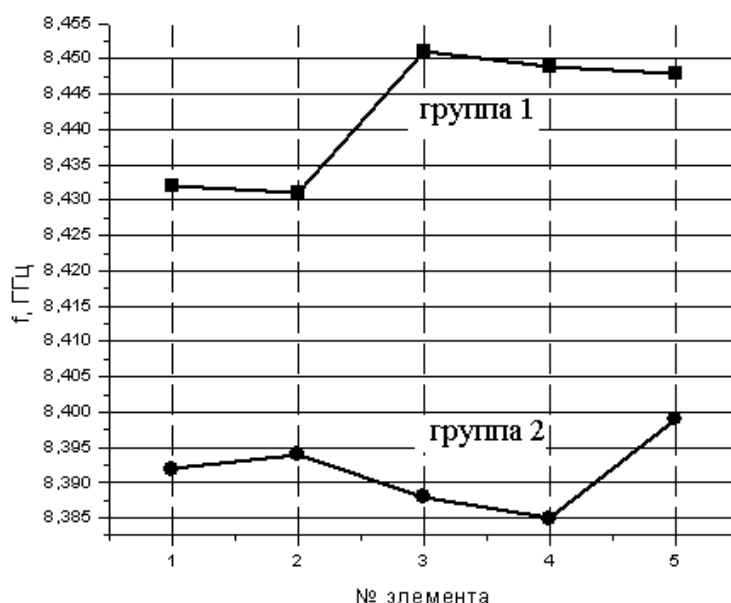


Рисунок 2. Значения частот резонансного измерительного преобразователя для разных элементов

Как видно из рисунка 2, значения частот для разных групп отличаются не более чем на 0,2 %, что подтверждает гипотезу о возможности сортировки элементов описанным образом.

На рисунке 3 представлены полученные в ходе эксперимента значения добротностей резонансного преобразователя, соответствующие исследованию различных элементов археологических объектов, разделенных на две группы сторонними методами. Точками на рисунке 3 отмечены значения информационных параметров.

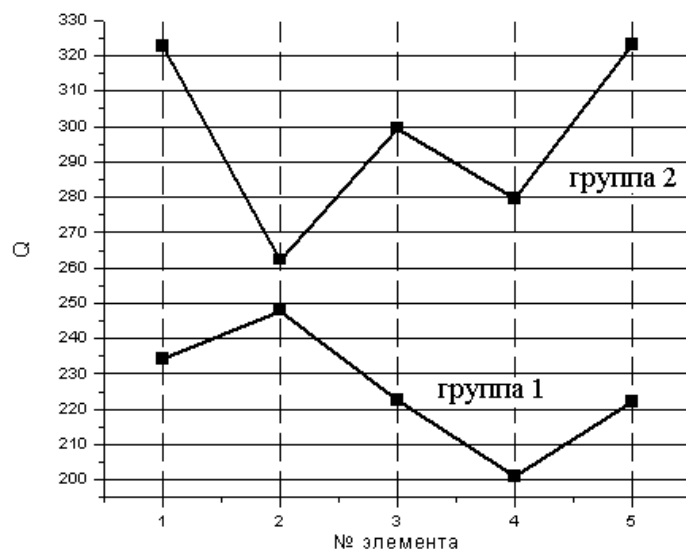


Рисунок 3. Значения добротностей резонансного измерительного преобразователя для разных элементов

Небольшое значение добротностей (по рисунку 3) объясняется недостаточной полировкой поверхностей резонатора. Как видно из рисунка, значения добротностей для разных групп отличаются не более чем на 19 %, что вписывается в инструментальную погрешность и подтверждает гипотезу о возможности сортировки элементов предложенным образом.

3. Заключение

В работе проведено численное моделирование резонансного измерительного преобразователя, применяемого для анализа электрофизических параметров элементов археологических объектов. На основе разработанной модели проведена оптимизация геометрии резонатора. Изготовлен прототип, проведен эксперимент с диэлектрическими объектами. В эксперименте подтверждена высокая чувствительность РИП к изменению электрофизических параметров исследуемых объектов. Предложена методика сортировки элементов археологических объектов.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 22-22-20126)**.

Список литературы

1. Мыц В.Л. Отчет об охранных раскопках Горно-Крымской экспедиции ИА АН УССР в 1984 г. // ФГБУН «Институт археологии Крыма РАН». Д № 1984/76.
2. Щепинский А.А. Археологическое обследование Курцово-Сабловской долины в 1950 г. // ИАДК 1957, с. 307 – 327.
3. Гордиенко Ю.Е. СВЧ диагностика слоистых полупроводниковых материалов: Дисс. Докт. физ.-мат. наук: 01.04.03. Харьков: ХИРЭ, 1984. 397 с.
4. Егоров В.Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 2. – С. 5 – 38.
5. Chen L. Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization. New York: John Wiley & Sons, 2004. – 537 p.
6. Детинко М.В. Физические основы неразрушающего СВЧ-резонаторного метода локального контроля электрофизических параметров полупроводников. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1988. – 30 с.

7. Завьялов А.С. Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах – Томск: Изд-во ТГУ, 1985. – 213 с.
8. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматгиздат, 1963. – 404 с.
9. Гершензон Е.М. Методы определения параметров полупроводников и полупроводниковых пленок на СВЧ // Полупроводниковые приборы и их применение. – М.: Сов. радио, 1970. – Вып. 23. – С. 3 – 48.
10. Гордиенко Ю.Е. Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 1996. – Вып. 100. – С. 253 – 260.