

УДК 537

Применение СВЧ измерений для сортировки составных элементов археологических объектов

¹ Полетаев Д. А., ¹ Мальцев К. С., ² Майко В. В., ² Власов В. П.

¹ Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского
просп. Акад. Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Российская Федерация
poletaevda@cfuv.ru

² Институт археологии Крыма РАН
просп. Акад. Вернадского, 2, г. Симферополь, 295007, Российская Федерация

Получено: 21 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В 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, характеристика преобразования.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Применение СВЧ измерений для сортировки составных элементов археологических объектов / Д. А. Полетаев и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 4. С. 458—471.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Применение СВЧ измерений для сортировки составных элементов археологических объектов / Д. А. Полетаев, К. С. Мальцев, В. В. Майко и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 458—471.

1. Введение

К археологическим относят объекты, найденные в культурном слое: керамическую посуду, металлические изделия, черепицу, деревянные элементы и др. 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 фрагментов для восстановления целого объекта является весьма трудоемкой задачей [1, 2]. Действительно, отбор отдельных фрагментов, 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. Рентгеноструктурный анализ, повсеместно применяемый при анализе минералов, слишком трудоемок. Методы радиоизотопной сортировки элементов ресурсозатратны. Оптические сканеры, работающие с оптическими вихрями и спеклами в большинстве своем применимы только для прозрачных объектов. 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 [11—15].

С учетом востребованности СВЧ методов диагностики и их возможного широкого использования актуальным является численно-аналитическое моделирование РИП, которое, в частности, позволяет рассчитывать его характеристики преобразования — исходный материал для дальнейшей компьютерной обработки и визуализации результатов измерений. Проведение многопараметрической оптимизации, количественное исследование метрологических параметров, обоснование применения новых типов РИП и их возможностей также нуждаются в создании адекватной численной модели.

СВЧ методы диагностики находят широкое применение в науке, технике и народном хозяйстве. Повсеместное использование аппаратуры, базирующейся на этих методах, обусловлено неразрушаемостью образца, отсутствием физического контакта, возможностью получения экспресс-данных при проведении исследований [12]. В наибольшей степени подоб-

ная аппаратура востребована в агропромышленных хозяйствах (измерители влажности), в различных областях науки и производства (микроволновая микроскопия), и в биологии (для исследования характеристик объектов) [11—14]. Неотъемлемой составляющей аппаратуры при использовании ближнеполевых СВЧ методов являются резонаторные измерительные преобразователи (РИП), конструкции и геометрия которых определяются областью использования. С учетом многообразия используемых сенсоров рассматривается конструкция, которая нашла применение для исследований распределенных структур, производящая усреднение измеряемых параметров по объему и площади исследуемого объекта, каковыми и являются элементы археологических объектов — РИП КИА (резонаторный измерительный преобразователь с коаксиальной измерительной апертурой).

Изменяемыми характеристиками элементов археологических объектов являются электрофизические параметры: относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь. Данные величины однозначно связаны с информационными сигналами РИП КИА: добротностью, резонансной частотой и их изменениями.

Прямое определение электрофизических параметров археологических объектов весьма трудоемко. Это связано с необходимостью проведения предварительной калибровки РИП КИА с конкретными геометрическими размерами, а также с особенностями проведения экспериментов: на измеряемые параметры оказывают сильное влияние неплотность прилегания объекта исследования к апертуре, внешние факторы. Кроме того, требуется проведение оптимизации параметров измерительного преобразователя для обеспечения одновременно высокой чувствительности при сохранении усредненного характера измерений.

Усреднение легко достижимо в традиционных закрытых резонаторах диэлькометрических методов [10]. Однако необходимость каждый раз помещать объект внутрь резонатора, что требует существенных затрат времени, осложняет его применения для серий проб.

Экспресс-контроль электрофизических параметров фактически требует внешнего по отношению к датчику расположения объекта и измерений в режиме реального времени. Концептуально это может быть портативный прибор, легко применимый археологами при полевых работах.

Существует большое количество работ экспериментального и теоретического характера, посвященных исследованию применения резонаторных измерительных преобразователей для измерения электрофизических параметров [12—15]. Однако в этих работах не уделяется должного внимания оптимизации чувствительности датчика для различных керамик, составляющих большую часть археологических находок. Теоретиче-

ское обоснование выбора параметров РИП базируется 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 [11].

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

2. Теоретическая часть

На рис. 1 приведена конструкция рассматриваемого РИП КИА с прилегающим объектом.

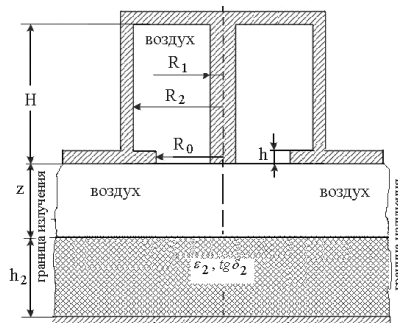


Рис. 1. Модель РИП КИА.

Fig. 1. Resonator transducer model with coaxial measuring aperture

Модель включает отрезок коаксиального волновода, образец толщиной h_2 с электрофизическими параметрами $\epsilon_2, tg \delta_2$.

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 [12]. Из теории коаксиальных линий передач [14—17] 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.

Максимум дисперсии для воды приходится на частоту около 10 ГГц [12]. Предварительный анализ позволяет выбрать геометрические размеры модели: $H/\lambda = 1,25$; $R_2/\lambda = 0,17$; $h/H = 5,6 \cdot 10^{-3}$; $z = \infty$ (четвертьволновый резонатор нагружен на свободное пространство); проводимость стенок резонатора принята равной $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$ См/м (с целью учета влияния шероховатости стенок). Исследование влияния остальных геометрических размеров и параметров РИП и образца осуществлялось с помощью численной модели, в основе которой лежит метод конечных элементов, предусматривающий решение волновых уравнений с заданными краевыми условиями [17, 18].

3. Результаты моделирования

Из общих физических представлений следует, что выбором радиуса R_0 апертуры можно существенно изменять добротность резонаторного измерительного преобразователя. На рис. 2 приведены зависимости добротности и резонансной частоты РИП от величины R_0 , рассчитанные при отсутствии объекта исследования.

Как видно из графиков на рис. 2, уменьшение R_0 апертуры снижает потери на излучение в свободное пространство. Необходимость учета излучательных потерь наиболее явно демонстрируется на зависимости добротности от R_0 апертуры (рис. 2а). Даже при малом размере R_0 добротность при учете излучения и без учета отличаются почти в 2 раза. Требуется отметить, что добротность РИП уменьшается в 1,5 раза по сравнению с РИП, в котором выдержано оптимальное соотношение радиусов. Данное снижение добротности приходится считать вынужденным при проектировании РИП для исследования объектов с высоким тангенсом угла диэлектрических потерь. Из графика на рис. 2б видно, что учет излучения практически не влияет на резонансную частоту.

На рис. 3 приведены зависимости добротности и резонансной частоты РИП от продольного размера апертурно-формирующей части коаксиала h при разных значениях величины R_0 .

Характер изменения добротности (рис. 3а) носит резонансный характер. Более острый резонансный пик соответствует меньшему R_0 , что согласуется с общими физическими представлениями. Уменьшение резонансной частоты (рис. 3б) обуславливается ростом емкости апертуры, при увеличении ее продольного размера апертурно-формирующей части коаксиала.

Как видно из графика (рис. 3а) добротность РИП при исследовании образца с параметрами $\epsilon_2 = 3$; $\text{tg} \delta_2 = 0,01$ остается довольно высокой даже при раскрывах апертуры $R_0 / R_2 > 0,3$. Отчетливо видно значительное изменение добротности с образцом, при $h / H \approx 0,4$ (что соответствует $h / \lambda = 0,5$), относительно добротности, рассчитанной при нагрузке на свободное пространство (рис. 3а). Данный факт согласуется с физическими представлениями и свидетельствует об адекватности численной модели. Вместе с тем, даже при $h / H \approx 0,4$, изменение добротности РИП в 2 раза меньше, чем при $h \rightarrow 0$. Это связано со значительным провисанием поля из апертуры. Из графика на рис. 3, а следует весьма важный вывод: наибольшее изменение добротности обеспечивается при $h / H < 0,05$.

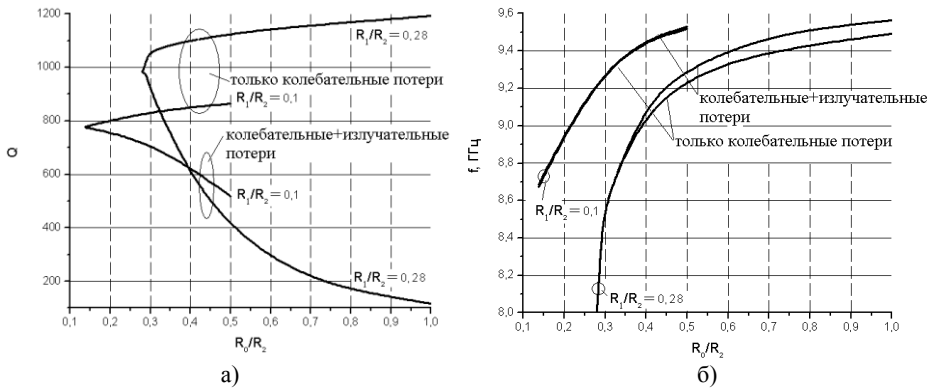


Рис. 2. Зависимость а) добротности и б) частоты от величины R_0 .
 Fig. 2. Dependence of a) quality factor and b) frequency on the value R_0

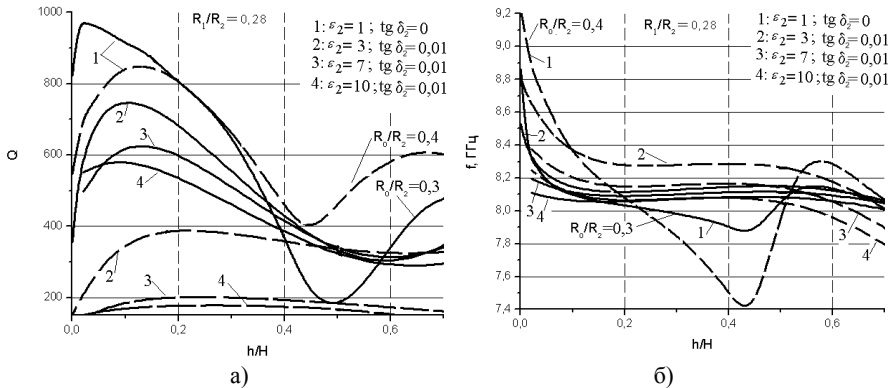


Рис. 3. Зависимость а) добротности, б) резонансной частоты от размеров апертуры.
 Fig. 3. Dependence of a) quality factor, b) resonant frequency on the size of the aperture

Значения электрофизических параметров археологических объектов характеризуется диапазоном изменения ε от 3 до 10 и $\operatorname{tg}\delta$ от 0,01 до 0,4 [1, 2]. Таким образом, численные исследования целесообразно проводить в данном диапазоне изменения электрофизических параметров исследуемого образца.

Расчеты проведены для модели с параметрами: $H/\lambda=1,25$; $R_2/\lambda=0,17$; $z=0$; $h_{21}=0$; $h_2/\lambda=0,14$; $h/H=0,01$; проводимость стенок $\sigma=5,8 \cdot 10^6$ См/м; $\lambda=3$ см, при изменении величины апертуры R_0/R_2 от 0,29 до 1, для образцов, параметры которых изменяются в указанных выше пределах. Графики зависимости добротности и чувствительности РИП от величины R_0 апертуры приведены на рис. 4. Чувствительность вычислялась исходя из изменения тангенса угла диэлектрических потерь $d\operatorname{tg}\delta_2=0,01$, при значении $\operatorname{tg}\delta_2=0,01$ и постоянной относительной диэлектрической проницаемости.

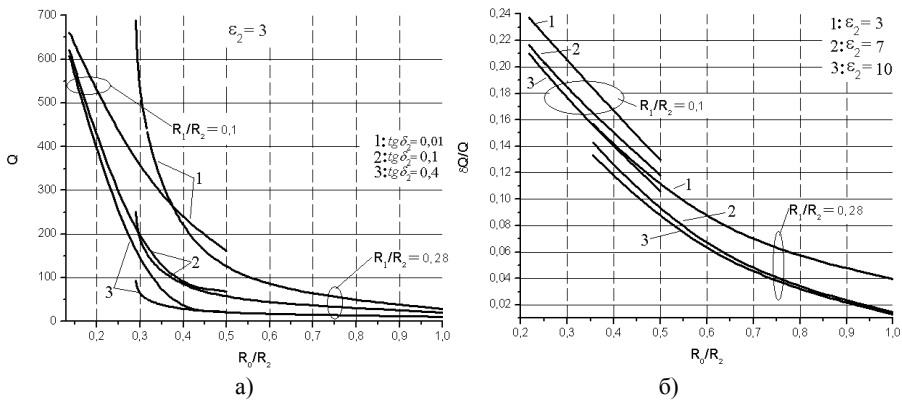


Рис. 4. Зависимость а) Q и б) $\delta Q/Q$ от величины апертуры и параметров образца.

Fig. 4. Dependence of а) Q and б) $\delta Q/Q$ on the aperture value and sample parameters

Добротность РИП (рис. 4а) в большей степени зависит от величины апертуры, которая определяет величину излучательных потерь. Чувствительность датчика (рис. 4, б) увеличивается при уменьшении R_0/R_2 .

На рис. 5 представлены зависимости резонансной частоты и изменения резонансной частоты при вариации величины апертуры R_0/R_2 .

Как видно из графиков (рис. 4 и рис. 5), добротность при наличии объекта, удобная в метрологическом отношении [12], достигается в узком диапазоне значений R_0 . При этом чувствительность к образцам с высокой диэлектрической проницаемостью оказывается недостаточной. Поэтому

оптимизировать такой резонаторный измерительный преобразователь следует отдельно для объектов с низким и высоким значением диэлектрической проницаемости.

Из графиков (рис. 6) видно, что большее значение относительной диэлектрической проницаемости образца увеличивает значение добротности системы, вследствие “запирания” энергии внутри резонатора.

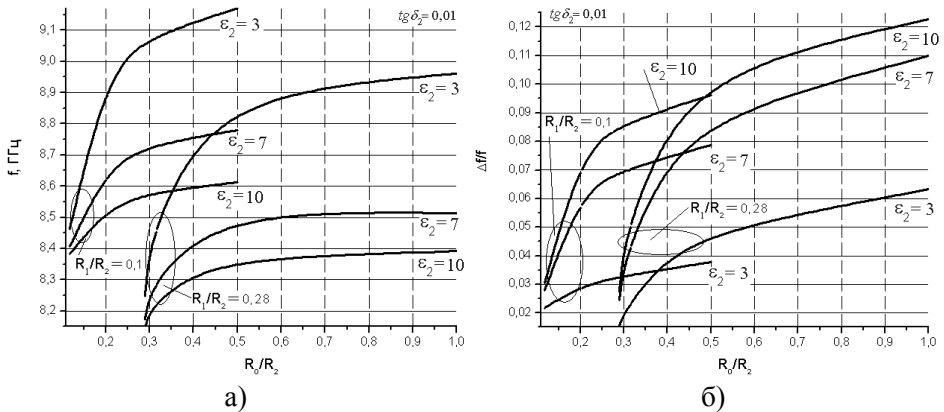


Рис. 5. Зависимость а) f и б) $\Delta f / f$ от величины апертуры и параметров образца.
 Fig. 5. Dependence of a) f and b) $\Delta f / f$ on the aperture value and sample parameters

На рис. 6 и рис. 7 приведены рассчитанные характеристики преобразования РИП КИА с различными геометрическими размерами апертуры.

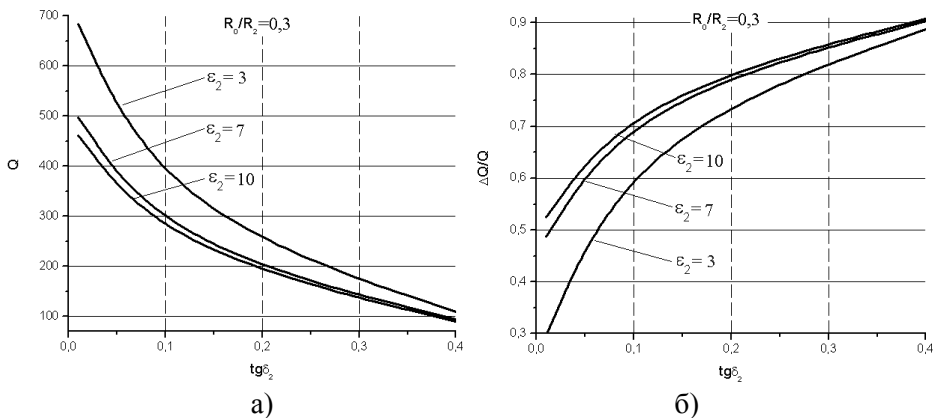
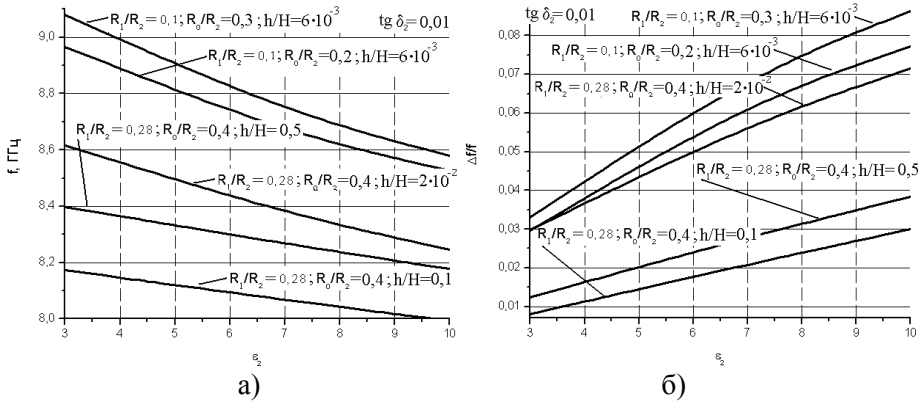


Рис. 6. Зависимость а) Q и б) $\Delta Q / Q$ от параметров образца.
 Fig. 6. Dependence of a) Q and b) $\Delta Q / Q$ on the parameters of the sample

Рис. 7. Зависимость а) f и б) $\Delta f / f$ от параметров образца.Fig. 7. Dependence of а) f and б) $\Delta f / f$ on the parameters of the sample

4. Постановка эксперимента

На основе численной модели проведена оптимизация геометрии резонансного преобразователя. 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 фрагменты керамики с приблизительными размерами: 1 см × 1 см × 1 см, практически идентичные визуально. Количество элементов: 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.

5. Результаты и обсуждение

На рис. 8 представлены полученные в ходе эксперимента значения резонансных частот резонансного преобразователя, соответствующие исследованию различных элементов археологических объектов, разделенных на две группы сторонними методами. Точками на рис. 8 отмечены дискретные значения информационных параметров.

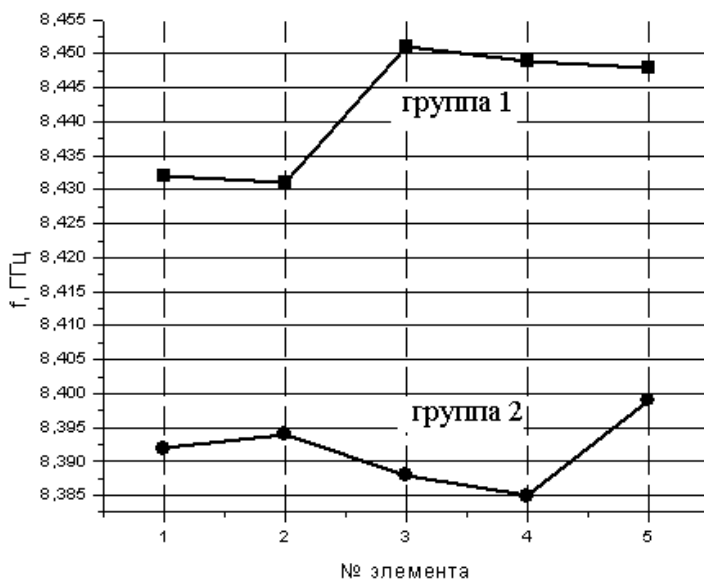


Рис. 8. Значения частот резонансного измерительного преобразователя для разных элементов
 Fig. 8. Frequency values of the resonant measuring transducer for different elements

Как видно из рис.8, значения частот для разных групп отличаются не более чем на 0,2 %, что подтверждает гипотезу о возможности сортировки элементов описанным образом.

На рис. 9 представлены полученные в ходе эксперимента значения добротностей резонансного преобразователя, соответствующие исследованию различных элементов археологических объектов, разделенных на две группы сторонними методами. Точками на рис. 9 отмечены дискретные значения информационных параметров.

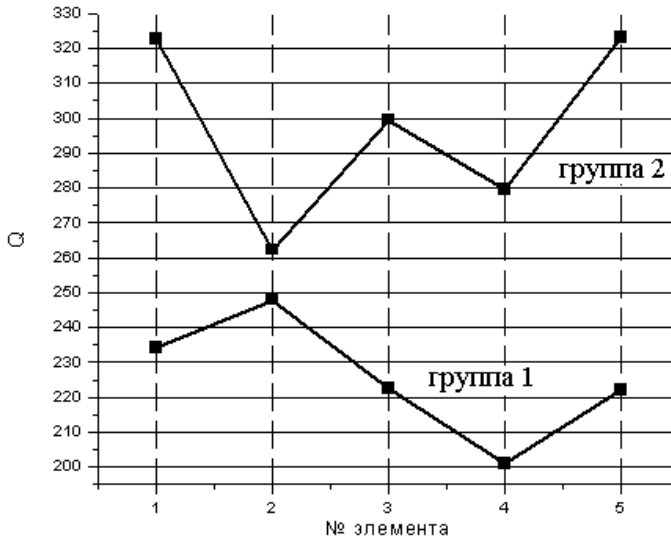


Рис. 9. Значения добротностей резонансного измерительного преобразователя для разных элементов.

Fig. 9. Values of the quality factors of the resonant measuring transducer for different elements

Небольшое значение добротностей (по рис. 9) объясняется недостаточной полировкой поверхностей резонатора. Как видно из рис. 9, значения добротностей для разных групп отличаются не более чем на 19 %, что вписывается в инструментальную погрешность и подтверждает гипотезу о возможности сортировки элементов описанным образом.

6. 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.

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. Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization / L. Chen et al. 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. : Физматиздат, 1963. 404 с.
9. Гершензон Е. М. Методы определения параметров полупроводников и полупроводниковых пленок на СВЧ // Полупроводниковые приборы и их применение. 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.
11. Рябухин А. А. Электродинамические модели резонаторных сенсоров в СВЧ диагностике полупроводников : дисс. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.03. Харьков : ХНУРЭ, 2002. 158 с.
12. Гордиенко Ю. Е. Измерительные преобразователи для неразрушающего контроля электропроводности пленок в эпитаксиальных структурах pn^+ типа // Электронная техника. Серия 8. 1974. Вып. 9. С. 112—117.
13. Hong S. Improved surface imaging with a near-field scanning microwave microscope using a tunable resonator // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 80, no. 3. P. 524—526.
14. Медведев Ю. В. Техника неразрушающего измерения удельного сопротивления, толщины и времени жизни неосновных носителей заряда по площади эпитаксиальных пленок // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1984. № 10. С. 50—54.
15. Imtiaz A. Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope // Journal of applied physics. 2006. Vol. 100. P. 1—8.
16. Гордиенко Ю. Е. Вклад колебательных и излучательных потерь в характеристики СВЧ преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой // Радиотехника. 2009. № 157. С. 108—114.
17. Кураев А. А. Электродинамика и распространение радиоволн. Минск : 2004. 358 с.
18. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ. М. : 1990. 335 с.

Информация об авторах

Полетаев Дмитрий Александрович, доцент Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, г. Симферополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-2898-960X.

Мальцев Константин Сергеевич, магистр Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, г. Симферополь, Российская Федерация.

Майко Вадим Владиславович, директор института археологии Крыма РАН, г. Симферополь, Российская Федерация.

Власов Владимир Петрович, научный сотрудник института археологии Крыма РАН, г. Симферополь, Российская Федерация.

The Use of Microwave Measurements for Sorting the Constituent Elements of Archaeological Objects

D. A. Poletaev¹, K. S. Maltsev¹, V. V. Maiko², and V. P. Vlasov²

¹Crimean Federal University n. a. V. I. Vernadsky
4, Acad. Vernadsky Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation
poletaevda@cfuv.ru

²Institute of Crimean Archeology RAS
2, Acad. Vernadsky Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation

Received: May 21, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: In this paper the design of a coaxial resonant measuring converter with a shortening capacitance used to determine the electrophysical parameters of the constituent elements of archaeological objects is proposed. Based on the numerical model, the optimal geometric dimensions of the resonant sensor are determined. The analysis of the main characteristics of the measuring transducer is carried out. A number of experimental data were obtained confirming the applicability of the proposed technique.

Keywords: archaeological object, microwave resonator, resonant measuring converter, aperture, conversion characteristic.

For citation (IEEE): D. A. Poletaev, K. S. Maltsev, V. V. Maiko, and V. P. Vlasov, "The Use of Microwave Measurements for Sorting the Constituent Elements of Archaeological Objects," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 458–471, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.34. (In Russ.).

References

- [1] V. L. Myts, *Report on the security excavations of the Crimean Mountain Expedition of the IA Academy of Sciences of the Ukrainian SSR in 1984*. Institute of Archeology of Crimea RAS, no. 1984/76, 1984. (In Russ.).
- [2] A. A. Schepinsky, *Archaeological survey of the Kurtsovo-Sablovskaya valley in 1950*, IADC, pp. 307–327, 1957. (In Russ.).
- [3] Yu. Ye. Gordienko, *Microwave diagnostics of layered semiconductor materials: diss. ...* doct. phys.-math. sci., Kharkov, KhIRE, 1984. (In Russ.).
- [4] V. N. Egorov, "Resonance methods for studying dielectrics at microwave frequencies," *Pribory i tekhnika eksperimenta*, no. 2, pp. 5–38, 2007. (In Russ.).
- [5] L. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan, and Vijay K. Varadan *Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization*, New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [6] M. V. Detinko, *Physical foundations of the non-destructive microwave resonator method for local control of the electrophysical parameters of semiconductors*. Tomsk: Publishing House of Tomsk University, 1988. (In Russ.).

- [7] A. S. Zavyalov, *Measurement of parameters of materials at microwave frequencies*, Tomsk: Publishing House of TGU, 1985. (In Russ.).
- [8] A. A. Brandt, *Investigation of dielectrics at superhigh frequencies*. Moscow: Fizmatizdat, 1963. (In Russ.).
- [9] E. M. Gershenzon, "Methods for determining the parameters of semiconductors and semiconductor films on microwave," *Semiconductor devices and their application*, iss. 23, pp. 3–48, 1970. (In Russ.).
- [10] Yu. Ye. Gordienko, "Resonator measuring transducers in the diagnostics of microlayered structures," *Radiotekhnika*, iss. 100. pp. 253–260, 1996. (In Russ.).
- [11] A. A. Ryabukhin, *Electrodynamic models of resonator sensors in microwave diagnostics of semiconductors*: diss. ... cand. phys.-math. sci. Kharkov: KhNURE, 2002. (In Russ.).
- [12] Yu. Ye. Gordienko, "Measuring transducers for non-destructive testing of the electrical conductivity of films in epitaxial structures of the nn^+ type," *Elektronnaya Tekhnika*, ser. 8, iss. 9, pp. 112–117, 1974. (In Russ.).
- [13] S. Hong, J. Kim, W. Park, and K. Lee, "Improved surface imaging with a near-field scanning microwave microscope using a tunable resonator," *Applied Physics Letters*, vol. 80, no. 3, pp. 524–526, Jan. 2002, doi: 10.1063/1.1435068.
- [14] Yu. V. Medvedev, "Technique for non-destructive measurement of resistivity, thickness and lifetime of minor charge carriers over the area of epitaxial films," *Elektronnaya Tekhnika. Ser. 1. Microwave electronics*, no. 10, pp. 50–54, 1984. (In Russ.).
- [15] A. Imtiaz and S. M. Anlage, "Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope," *Journal of Applied Physics*, vol. 100, no. 4, p. 044304, Aug. 2006, doi: 10.1063/1.2234801.
- [16] Yu. E. Gordienko, "The contribution of oscillatory and radiative losses to the characteristics of microwave converters with a coaxial measuring aperture," *Radiotekhnika*, no. 157, pp. 108–114, 2009. (In Russ.).
- [17] A. A. Kuraev, *Electrodynamics and propagation of radio waves*, Minsk: 2004. (In Russ.).
- [18] A. D. Grigoriev, *Electrodynamics and microwave technology*, Moscow: 1990. (In Russ.).

Information about the authors

Dmitrii A. Poletaev, associate professor at V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation. ORCID 0000-0003-2898-960X.

Konstantin S. Maltsev, magister at V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation.

Vadim V. Maiko, director of the Institute of Crimean Archeology RAS, Simferopol, Russian Federation.

Vladimir P. Vlasov, researcher at the Institute of Crimean Archeology RAS, Simferopol, Russian Federation.