



ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИИ СВЧ РЕЗОНАТОРНЫХ ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

ГОРДИЕНКО Ю.Е., ХАММУД Ф.М.

Обосновываются принципы построения и оптимизации СВЧ резонаторных сенсоров для контроля влагосодержания порошковых материалов. Показывается, что рабочий диапазон частот необходимо выбирать выше 10^{10} Гц. Приводятся математические соотношения, позволяющие производить теоретическую градуировку сенсоров в различных диапазонах значений влагосодержания.

1. Введение

В технологии электронных компонент ряд функциональных и служебных материалов в исходном состоянии представляют собой порошковые неметаллические среды, влагосодержание которых существенно влияет на протекание процессов и эксплуатационные характеристики изделий. Зачастую достоверные сведения об этом факторе отсутствуют, и производитель вводит в технологию дополнительную процедуру и оборудование сушки материалов.

Практика убеждает в необходимости экспресс-контроля влажности исходных материалов, в ряде случаев на потоке. По аналогии с другими производствами оправдан вывод о перспективности применения СВЧ метода контроля влажности материалов электронной техники. Однако, учитывая низкие допустимые значения влагосодержания в этих материалах и малые их рабочие объемы, следует сосредоточиться на резонаторном варианте СВЧ влагометрии [1-3].

В «классическом» виде резонаторные измерительные преобразователи (ИП) не ориентированы на контроль влагосодержания материалов на потоке. Необходимо также решать задачи их оптимизации применительно к малым объемам проб и низкому влагосодержанию.

Поэтому целью настоящей разработки является обоснование принципов оптимизации таких ИП и развитие их теории в соответствии с возникающими требованиями.

Перспективной такой разработки является создание теоретической базы проектирования СВЧ влагоме-

ров с заданными метрологическими характеристиками, включая низкий порог влагосодержания.

2. Выбор диапазона рабочих частот

Постановка этой задачи в первую очередь вызвана необходимостью существенно снизить систематическую погрешность СВЧ метода влагометрии в области малых влагосодержаний и обеспечить воспроизводимость градуировки соответствующих технических средств. Кроме того, выбор рабочего диапазона частот повлияет на сложность техники контроля и доступность элементной базы.

Влагосодержащие порошковые материалы с точки зрения их электропроводности на высоких и сверхвысоких частотах представляют весьма сложный объект. Поэтому, несмотря на большой объем проведенных исследований, строгие модели зависимости их комплексной величины электропроводности от влагосодержания в настоящее время отсутствуют.

На рис. 1 представлены, взятые из работы [4], оценки влияния вклада различных механизмов в суммарные потери таких материалов на различных частотах. Из них следует, что только на СВЧ спектр включающихся потерь перестает быть сложным и сводится к потерям на поляризацию свободной воды.

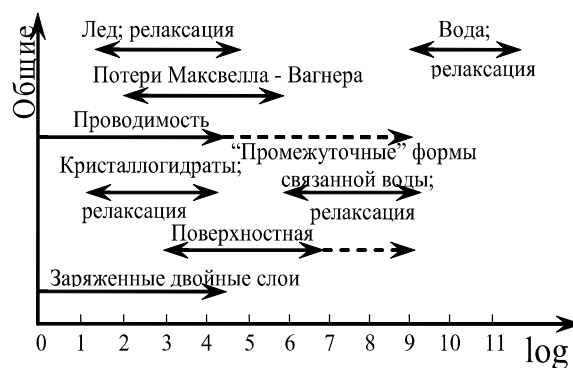


Рис. 1. Частотные распределения вклада различных составляющих в электрических потерях во влагосодержащих материалах

Следовательно, только на СВЧ возможно четко отсортировать вклад влаги в электродинамические характеристики порошковых материалов при условии небольших значений ϵ и $\text{tg}\delta$ таких материалов в абсолютно сухом виде.

Результаты измерения диэлектрических свойств таких материалов электронной техники, как окислы алюминия, тантала, кремния, фосфорные и борные ангидриды, люминофоры, электролюминофоры и др. [5], показывают, что соотношение превышения $\epsilon_{\text{воды}}$ и $\text{tg}\delta_{\text{воды}}$ в СВЧ диапазоне для них имеет место. Это позволяет надеяться на возможность создания СВЧ измерителей малого влагосодержания в таких материалах с хорошо воспроизводимой градуировкой.

Решение вопроса о чувствительности таких измерителей требует более детального выбора рабочей области частот. На рис. 2 приведены обобщенные сведения о частотной зависимости $\epsilon'_{\text{воды}}$, $\epsilon''_{\text{воды}}$, $\text{tg}\delta_{\text{воды}}$.

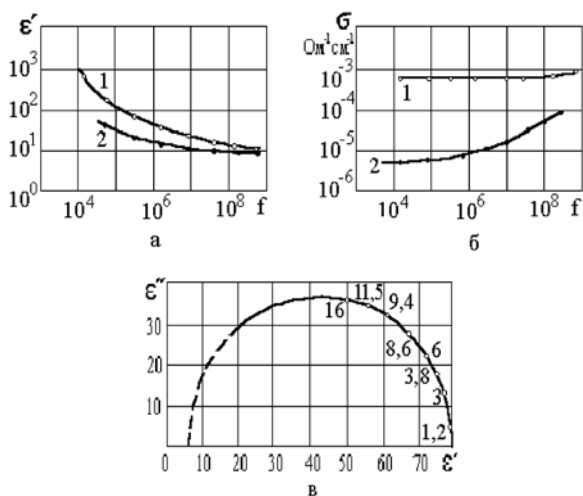


Рис. 2. Обобщенные экспериментальные данные о частотной зависимости диэлектрических свойств воды: 1 – пресная вода; 2 – соленая вода

В таблице представлены экспериментальные данные о температурной зависимости этих параметров в СВЧ диапазоне. Этими сведениями уже можно воспользоваться для выбора базового принципа СВЧ метода влагометрии и оптимального по чувствительности диапазона рабочих частот.

В отношении базового принципа это может означать построение метода на основе измерения либо

$\epsilon'_{\text{эфф}}$, либо $\left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)_{\text{эфф}}$, либо их какой-то комбинации.

Например, построение метода на основе измерения $\epsilon'_{\text{эфф}}$ целесообразно осуществлять в частотном диапазоне ниже 10^9 Гц, где $\epsilon'_{\text{воды}}$ еще не испытывает сильной дисперсии. При использова-

| Температура, °C | f = 9,37 ГГц | | f = 23 ГГц | |
|-----------------|--------------|-------------------|-------------|-------------------|
| | ϵ' | $\text{tg}\delta$ | ϵ' | $\text{tg}\delta$ |
| 0 | 44,1 | 0,92 | 15,4 | 1,7 |
| 5 | 49,2 | 0,79 | 18,2 | 2,1 |
| 15 | 57,5 | 0,6 | 26,1 | 1,28 |
| 25 | 63,2 | 0,44 | 34,4 | 1,05 |
| 30 | 65 | 0,4 | 38 | 0,95 |
| 40 | 66 | 0,32 | 44,3 | 0,75 |
| 50 | 65,2 | 0,26 | 48,1 | 0,64 |
| 70 | 61 | 0,17 | 52 | 0,43 |

нии в качестве фундаментальной информативной

величины $\text{tg}\delta_{\text{эфф}} = \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)_{\text{эфф}}$ на первый взгляд сле-

дует в качестве рабочего выбирать миллиметровый диапазон рабочих длин волн. Однако необходим учет и других факторов, влияющих на метрологические характеристики СВЧ влагомеров порошковых материалов. В частности, зависимость фундаментальной информативной величины ($\epsilon'_{\text{эфф}}$, $\text{tg}\delta_{\text{воды}}$ и т.п.) от структуры пробы материала, ее плотности, температуры и т.п. Важное значение также имеет предельное разрешение по изменению информативной величины, которое практически реализуется в рабочем диапазоне частот. Большинство разработок по СВЧ влагомерам сыпучих материалов [5-8] поставлено в 3-х см диапазоне длин волн и базируется либо на измерении $\text{tg}\delta_{\text{воды}}$, как информативной величины, либо на оценке комбинации $\epsilon'_{\text{эфф}}$, $\text{tg}\delta_{\text{эфф}}$.

Однако выбор этого диапазона объясняется не исключительно принципиальными соображениями, а несет отпечаток практических, связанных с освоенностью техники этой части СВЧ диапазона.

По принципиальным соображениям возможно следует воспользоваться тем обстоятельством, что

в миллиметровом диапазоне значений $\text{tg}\delta_{\text{воды}}$ в несколько раз выше, чем в сантиметровом. Однако в СВЧ влагометрии порошковых материалов электронной техники существенное влияние на выбор рабочего диапазона частот могут оказывать такие факторы, как требование нежестко контролируемого забора пробы и небольшой ее объем. Из опыта СВЧ диагностики полупроводниковых материалов [9,10] следует, что использование в качестве первичного измерительного преобразователя коаксиального резонатора с полностью открытым торцом (четвертьволновый) или с частично открытым торцом (тороидальный с укорачивающей емкостью) оказывается наиболее метрологически продуктивным. Объясняется сказанное такими свойствами указанных ИП, как наружное (на апертуре торца) размещение исследуемого объекта; высокая чувствительность резонансной частоты и добротности

к изменению $\epsilon_{\text{эфф}}$ и $\text{tg}\delta_{\text{эфф}}$ в области $\text{tg}\delta_{\text{эфф}} < 0,1$; хорошая изученность влияния различных мешающих факторов. По этим соображениям в работе исследуются свойства специализированных к измерению влагосодержания порошковых материалов резонаторных ИП коаксиального типа в диапазоне частот 10^{10} Гц.

3. Конструктивы резонаторных ИП и качественная оценка их свойств

При СВЧ контроле влагосодержания порошковых материалов могут возникать различные варианты формирования проб и их расположения в электромагнитном поле ИП. Так, наиболее часто встречающейся является ситуация, при которой ИП погру-

жается в относительно большой объем материала. Иногда необходимо ограничить объем пробы либо оценить содержание влаги в слоях на проводящих подложках. Существующее и возможное многообразие конструктивов можно схематично изобразить в трех разновидностях, представленных на рис.3,а,б,в.

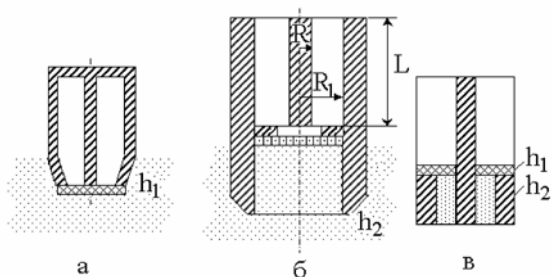


Рис. 3. Схематичное изображение различных конструктивов резонаторных ИП для СВЧ влагометрии порошковых материалов электронной технологии

Все они имеют основной резонансный объем, образованный коаксиалом, размеры которого выбирают из следующих соображений. Длина коаксиала L во всех случаях кратна нечетному числу

четвертой длин волн на рабочей частоте $-(2n+1)\frac{\lambda_0}{4}$.

Радиусы R_1 и R_2 выбирают из соображений обеспечения высокой добротности ИП без пробы и требуемого коэффициента включения пробы в электромагнитное поле резонатора. Из весьма качественных соображений — чем больше величина $\frac{R_2 - R_1}{R_1}$, тем глубже «провисает» поле в объеме пробы.

Апертурная часть ИП образована конструктивом торца и определяет как коэффициент включения пробы в ИП, так и дополнительные условия контроля.

Сразу же следует отметить, что коэффициент включения пробы в ИП имеет количественную меру, о которой будет сказано ниже, и определяет чувствительность ИП. Однако делать при этом вывод о необходимости его неограниченного увеличения будет неправильным, так как при сильном нагружении ИП пробой добротность его снижается, и резонансные свойства исчезают.

Конструктив рис. 3, а может быть как погруженным, так и накладным. В последнем случае он используется для контроля слоистых материалов на подложках. При проводящем характере подложки длина коаксиальной части резонатора должна быть кратной полуволновой. При диэлектрической подложке — четвертьволновой.

В случае полубесконечной порошковой среды или слоя на диэлектрической подложке свойства рассматриваемого конструктива в значительной мере определяются потерями СВЧ энергии на излучение в окружающий объем. Соответствие теоретических

оценок характеристик преобразования таких ИП по измерению $\epsilon_{эфф}$ и $tg\delta_{эфф}$ экспериментальным градуировкам не всегда высокое. Здесь уместно говорить о том, что к мешающим факторам следует относить вариацию полной геометрии системы ИП-объект.

Вместе с тем при контроле влагосодержания материалов «на потоке» такой конструктив наиболее приемлем по условиям эксплуатации.

Разработанный нами конструктив (см. рис. 3,б) может быть также погруженным, однако для контроля на потоке не применим. Важнейшей его особенностью является электродинамическая замкнутость резонаторного объема за счет выбора значения R_2 , при котором наименьший тип волны в цилиндрическом объеме с пробой оказывается запредельным на рабочей частоте ИП. Коэффициент включения пробы здесь может изменяться выбором зазора h_1 .

Характеристику преобразования такого ИП можно рассчитать (аналитически или численными методами). Условия формирования пробы здесь таковы, что мешающими факторами будут только плотность пробы и температура.

На рис. 3, в представлен конструктив, удобный для контроля малых объемов проб. Одновременно его достоинством является возможность аналитических оценок метрологических свойств ИП и его оптимизации по критерию чувствительности. Этому варианту конструктива в небольшой степени присущи указанные выше недостатки конструктива рис. 3, а, связанные с излучением СВЧ мощности через измерительную апертуру.

Ниже мы обсудим возможность существенного повышения чувствительности этого конструктива путем придания его апертуре резонансных свойств.

Общие представления о возможности качественных оценок метрологических свойств этих ИП дают следующие соображения.

Для влагосодержащих материалов на СВЧ в принципе изменение резонансной частоты и добротности ИП связаны как с изменением $\epsilon_{эфф}$ пробы, так и с изменением $tg\delta_{эфф}$. Поэтому в общем случае эти изменения необходимо представлять следующим образом:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta W_3}{W_3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial \epsilon_{эфф}} \cdot \Delta \epsilon_{эфф} \cdot \times$$

$$\times \cdot \left[\int_{V_0} E_0^2(\epsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) dV + \epsilon_{эфф} \int_{V_{пр}} E_1^2(\epsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) dV \right] \cdot \times$$

$$\times \cdot \left[\int_{V_0} E_0^2(\epsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) dV + \epsilon_{эфф} \int_{V_{пр}} E_1^2(\epsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) dV \right]^{-1} +$$

$$+ \left[\int_{V_0} E_0^2(\epsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) dV + \epsilon_{эфф} \int_{V_{пр}} E_1^2(\epsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) dV \right] \cdot \times$$

$$\times \left[\int_{V_0} E_0^2(\varepsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) dV + \varepsilon_{эфф} \int_{V_{пр}} E_1^2(\varepsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) dV \right]^{-1} \times \frac{\partial}{\partial \sigma_{эфф}} \cdot \Delta \sigma_{эфф}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{Q} \approx \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{эфф}} \cdot \left[\varepsilon_{эфф} \int_{V_{пр}} E_1^2(\varepsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) dV \right] \Delta \varepsilon_{эфф} \cdot \times \\ \times \left[P_0 + P_{изм} + \varepsilon_{эфф} \int_{V_{пр}} E_1^2(\varepsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) \right]^{-1} + \\ + \frac{\partial}{\partial \sigma_{эфф}} \left[\sigma_{эфф} \int_{V_{пр}} E_1^2(\varepsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) dV \right] \Delta \sigma_{эфф} \cdot \times \\ \times \left[P_0 + P_{изм} + \varepsilon_{эфф} \int_{V_{пр}} E_1^2(\varepsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}) \right]^{-1}, \quad (2) \end{aligned}$$

где W_3 и ΔW_3 – запасаемая в ИП за период колебания энергия электромагнитного поля и ее изменение, соответственно; P_0 и $P_{изм}$ – мощность СВЧ потерь в стенках ИП и на излучение, соответственно; $V_0, V_{пр}$ – объем свободной части резонатора и пробы, соответственно; $\sigma_{эфф} = 2\pi f \varepsilon_{эфф} \operatorname{tg} \delta_{эфф}$; $E_0(\varepsilon_{эфф}; \sigma_{эфф}); E_1(\varepsilon_{эфф}; \sigma_{эфф})$ – выражение для электрической компоненты СВЧ поля в основной части ИП и измерительной апертуре с пробой, которые зависят от координат и свойств пробы.

В очень грубом приближении можно считать, что связанное с влагосодержанием изменение $\varepsilon_{эфф}$ и $\delta_{эфф}$ не влияет на распределение полей E_0 и E_1 , а также что запасаемой в объеме пробы СВЧ энергией можно пренебречь в обоих выражениях.

Тогда

$$\frac{\delta f}{f_0} = \frac{\Delta f_0}{f_0} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{эфф}}{\varepsilon_{эфф}}, \quad \frac{\delta Q}{Q} = \frac{\Delta Q_0}{Q} \cdot \frac{\Delta \operatorname{tg} \delta_{эфф}}{\operatorname{tg} \delta_{эфф}}, \quad (3)$$

где $\frac{\Delta f_0}{f_0}, \frac{\Delta Q_0}{Q}$ – изменение резонансной частоты и добротности ИП, вызванное введением в измерительную апертуру сухой пробы, соответственно.

Приближенные количественные сведения о величине $\frac{\Delta f_0}{f_0}$ и $\frac{\Delta Q_0}{Q}$ для различных конструктивов ИП можно получить, воспользовавшись понятием вносимой емкости. Для варианта рис. 3, а воспользуемся известным представлением этой емкости [9], приводящим в данном случае к выражению

$$C = \frac{2\pi \varepsilon_0 R_2}{\ln(R_2/R_1)} \int_0^\infty \frac{J_0(\chi R_1) - J_0(\chi R_2)}{\chi} J_1(\chi R_1) d\chi, \quad (4)$$

где $J_{0,1}(\chi R_{1,2})$ – функция Бесселя нулевого и первого порядка; $\gamma_0 = \sqrt{\chi^2 - k_0}$ – постоянная распространения; $k_0 = 2\pi f_0 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \tilde{\varepsilon}_{эфф}}$ – постоянная распространения в исследуемой среде.

На рис. 4 приведены зависимости, позволяющие оценить парциальные чувствительности по обоим выходным сигналам измерительной информации для ИП на основе четвертьволнового коаксиального резонатора от уровня влагосодержания. При этом не детализируется связь $\varepsilon_{эфф}$ и $\operatorname{tg} \delta_{эфф}$ с физическим содержанием свободной воды.

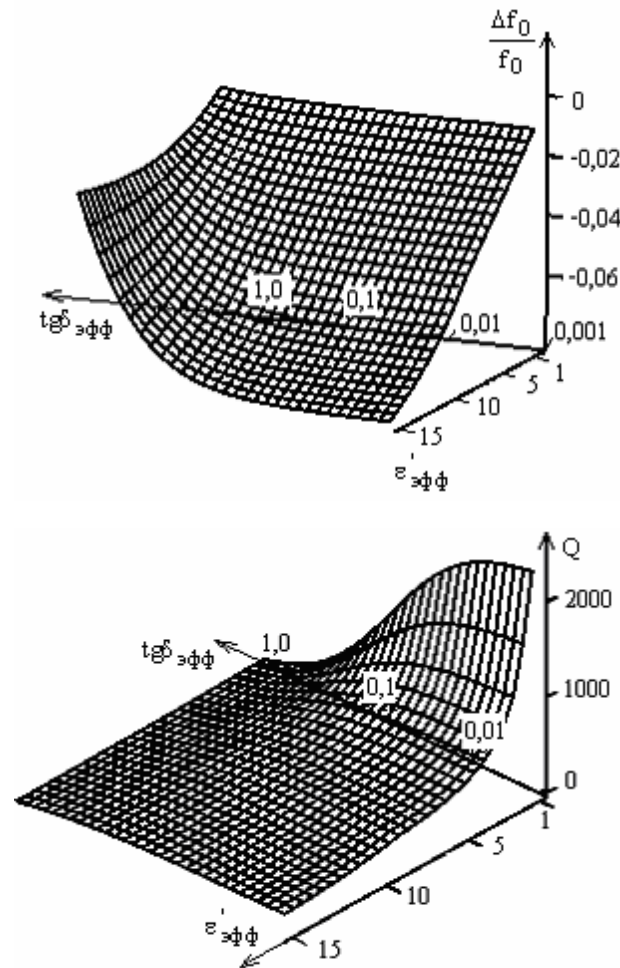


Рис. 4. Зависимость выходных сигналов измерительной информации ИП от параметров пробы

Приближенно можно также оценить чувствительность конструктива ИП рис. 3, в. Для этого достаточно воспользоваться представлением об изменении укорачивающей емкости, образованной коаксиальной апертурой с влагосодержащим порошком. Предположив, что добротность ИП контролируется преимущественно СВЧ потерями в образце пробы, представим выходные сигналы измерительной информации в виде

$$\begin{aligned} \frac{\delta f}{f_0} &= -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{C_{\text{вн}}}{C_0 + C_{\text{вн}}} \right) \frac{\Delta C_{\text{вн}}}{C_0 + C_{\text{вн}}} = \\ &= -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta f_0}{f_0} \right) \frac{\Delta f_0}{f_0} \frac{\Delta \varepsilon_{\text{эфф}}}{\varepsilon_{\text{эфф}}}, \\ \frac{\delta Q}{Q} &= \frac{\Delta C''_{\text{вн}}}{C_{\text{вн}}} = \frac{\Delta Q_0}{Q} \frac{\Delta \text{tg} \delta_{\text{эфф}}}{\text{tg} \delta_{\text{эфф}}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где C_0 – полная емкость ИП в представлении его резонансной частоты по формуле Томсона; $C_{\text{вн}}$ – емкость, вносимая материалом пробы; $C''_{\text{вн}}$ – СВЧ

потери, вносимые материалом пробы; $\frac{\Delta f_0}{f_0}$, $\frac{\Delta Q_0}{Q}$ – изменения резонансной частоты и добротности ИП, которые вызывает внесение сухого материала пробы.

Формулы (3)–(5) позволяют качественно определить зависимость чувствительности ИП по обоим сигналам измерительной информации от геометрических параметров резонатора и измерительной апертуры. Для получения количественных представлений об этих зависимостях можно воспользоваться значениями $\frac{\Delta f_0}{f_0}$ и $\frac{\Delta Q_0}{Q}$ при соответствующем диапазоне величин $\varepsilon_{\text{эфф}}$ и $\text{tg} \delta_{\text{эфф}}$ из работ [9–11].

Вариант конструктива ИП, изображенный на рис. 3, б, нам представляется оптимальным при влагометрии порошковых материалов электронной техники. В первую очередь при этом конструктиве сведены к нулю неконтролируемые и трудно учитываемые СВЧ потери в окружающую среду. Для него возможно построение строгой математической модели, численная реализация которой позволит точно построить характеристики преобразования по каждому сигналу, а следовательно, и свойства градуировочных характеристик. Кроме того, здесь реализуются хорошо контролируемые изменения степени включения материалом пробы в электромагнитные поля ИП, что позволит на практике настраивать его оптимально по метрологическим критериям.

Заключение

1. Рабочий диапазон частот СВЧ резонаторов датчиков контроля влагосодержания порошковых материалов целесообразно выбирать выше 10^{10} Гц.
2. Для обеспечения дозированного включения контролируемого материала из произвольного объема пробы в датчиках целесообразно формировать измерительную апертуру коаксиального типа.
3. Математические соотношения для воспроизводимой теоретической градуировки датчиков можно базировать на значениях параметров их исходного состояния с включением сухой пробы. Для каждого из обоснованных конструктивов ИП эти соотношения получаются из корректного решения соответствующей электродинамической задачи.

4. Одновременно приведенные соотношения являются исходными для оптимизации датчиков по критериям чувствительности, диапазону измеряемого влагосодержания и уменьшению влияния мешающих факторов.

Таким образом, в данной работе получены новые научные результаты, связанные с обоснованием принципов построения и оптимизации СВЧ резонаторных сенсоров для контроля влагосодержания в порошковых материалах и формулировкой математических соотношений для характеристик преобразования соответствующих сенсоров.

Практическая значимость работы состоит в применимости ее результатов для создания нового поколения СВЧ влагомеров порошковых материалов, встраиваемых в технологический процесс и имеющих улучшенные метрологические характеристики по чувствительности и систематической погрешности.

Литература: 1. Bourdel E., Pasquef D., Denorme P., Roussel A. Measurement of the moisture content with a cylindrical resonating cavity in TM₀₁₀ mode // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. 2000. Vol.49, №5. P. 1023-1028. 2. Trabelsi S., Kraszewski A.W., Nelson S.O. Unified calibration method for nondestructive dielectric sensing of moisture content in granular materials // Electron. Lett. 1999. Vol. 35, № 16. P. 1346-1347. 3. Nyfors E., Vainikainen P. Industrial measurement sensors // Artech House, Inc. Norwood. 1989. 345 P. 4. Де Лоп Г.П. Диэлектрические свойства гетерогенных влагосодержащих смесей // Приборы и системы управления. 1974. №9. С. 19-29. 5. Бензарь В.К. Техника СВЧ влагометрии. М.:Высш. шк., 1974. 350 с. 6. Nelson S.O. Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of high-moisture corn // J. Microwave Power, 1978. 13(2). P. 213-218. 7. Bartley P.G., Nelson S.O., McClendon R.W., Trabelsi S. Determining moisture content of wheat with an artificial network from microwave transmission measurement // IEEE. Trans. Instrum. Meas. 1998. Vol. 47, №1. P. 123-126. 8. Nelson S.O. Microwave dielectric properties of grain and seed // Trans. ASAE. 1973. 16(5). P. 902-905. 9. Ахманаев В.Б., Детинко В.М., Медведев Ю.В. и др. Неразрушающие бесконтактные СВЧ резонаторные методы контроля полупроводниковых материалов (Обзор) // Дефектоскопия. 1986. № 1. С. 33-35. 10. Гордиенко Ю.Е., Панченко А.Ю., Рябухин А.А. Теоретический анализ резонаторного СВЧ измерительного преобразователя тороидального типа // Радиотехника. 2000. №113. С. 174-179. 11. Гордиенко Ю.Е. Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур // Радиотехника. 1996. №100. С. 253-260.

Поступила в редколлегию 26.05.2004

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Фисун А.И.

Гордиенко Юрий Емельянович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, тел.: (0572) 70-21-362, 331-335.

Хаммуд Фади Мохамед, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, тел.: (0572) 70-21-362.