

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ РЕЗОНАНСНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С АПЕРТУРНЫМИ И ЗОНДОВЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Введение

Современные достижения физики и техники СВЧ позволяют создавать высокоэффективные методы и технические средства для бесконтактного неразрушающего исследования и контроля физико-технических и физико-химических свойств полупроводниковых и диэлектрических материалов и структур [1 – 7]. Методы СВЧ диагностики отличаются разнообразием подходов к решению теоретических задач, методик измерений и конструкций измерительных преобразователей (ИП) СВЧ.

По типу используемых в первичных измерительных преобразователях физических явлений СВЧ датчики можно разделить на волноводные и резонаторные [1 – 6, 8, 9]. Резонаторные измерительные преобразователи (РИП) позволяют повысить чувствительность измерений по сравнению с волноводными ИП. Это возможно благодаря тому, что резонаторы накапливают энергию СВЧ колебаний и, соответственно, накапливают результат влияния возмущения электромагнитного поля (ЭМП) исследуемым образцом. Вводя понятие метрологического взаимодействия, резонаторные преобразователи можно классифицировать на РИП с объемным, апертурным, поверхностным и микронзондовым ближнеполевым взаимодействием.

По способу связи ЭМП в РИП и образце можно выделить резонаторные ИП объемного и апертурного взаимодействия. В первом случае образец вносится в полость СВЧ резонатора, внося возмущение в структуру его электромагнитного поля. В этом случае судить об электрофизических параметрах исследуемого образца можно по степени возмущения СВЧ поля, с усреднением по его объему. Во втором случае образец связан с полем резонатора через апертуру, вследствие чего появляется возможность локализации области, в которой измеряют параметры. Кроме того, в этом случае взаимодействие является ближнеполевым, вследствие чего преодолевается барьер Аббе и разрешающая способность определяется геометрическими параметрами апертуры, а не рабочей длиной волны [1, 5, 7].

Для РИП апертурного типа величина коэффициента преобразования определяется характером и степенью взаимодействия полей резонатора с объектом через апертуру.

В последние годы с развитием методов сканирующей зондовой микроскопии и необходимостью изучения параметров различных объектов на микро- и наноразмерном уровне формируется направление диагностики, связанное со сканирующей микроволновой микроскопией (СММ) [1 – 3, 5 – 7, 10]. Основой СММ является ближнеполевое взаимодействие микроволновых электромагнитных полей, создаваемых микронзондовыми структурами, с локализованными (степень локализации определяется размерами и конструкцией микронзонда) поверхностными и приповерхностными слоями исследуемых материалов.

Функциональная схема сканирующего микроволнового микроскопа (СММ) представляет собой сочетание как минимум трех систем: систему позиционирования по осям X, Y и Z; систему формирования сигналов измерительной информации и систему обработки данных измерений. Все системы должны функционировать совместно и синхронно как в режиме реального времени по выделенному ряду задач, так и с запоминанием и последующей обработкой предварительных результатов измерений.

Несмотря на важность и необходимость указанных систем и их элементов, тем не менее, можно выделить те из них, которые в максимальной степени влияют на параметры СММ.

В первую очередь это микроволновые измерительные преобразователи (включая РИП), особенности конструкций и схемных решений которых главным образом определяют чувствительность и разрешающую способность проводимых измерений.

Немаловажной частью СММ также является система формирования и обработки информационных сигналов, которая используется для выделения и измерения изменений параметров ИП (или РИП).

Цель работы – анализ влияния изменения условий взаимодействия апертурных или зондовых чувствительных элементов РИП с объектами исследования на процесс формирования основных информационных сигналов.

Основная часть

Особенностью РИП, применяемых в СММ, является наличие микрозондовых структур, геометрические размеры и форма которых во многом определяют функциональные и метрологические возможности СММ в целом.

Как правило, такая микрозондовая структура представляет собой малоразмерный волноводный или коаксиальный излучатель (микроантенну), который непосредственно входит в резонатор или подсоединяется к нему посредством элемента связи.

При создании и конструировании РИП с микрозондовыми структурами должен быть выполнен ряд требований.

При исследовании электрофизических характеристик материалов, сред и объектов для зондирования используется электрическая составляющая электромагнитного поля, создаваемого зондом в области исследуемого образца. Зонд представляет собой структуру, формирующую соответствующую конфигурацию электрического поля. Для эффективного формирования требуемой конфигурации электрического поля необходимо учитывать характер взаимодействия зондовой структуры с составляющими электромагнитного поля резонатора. При этом конструкция и технология изготовления резонатора должны обеспечивать его максимальную собственную добротность при возбуждении на виде колебаний, подходящем для сопряжения с микрозондовой структурой.

Аналогичные требования должны выполняться при использовании зондов, формирующих требуемую конфигурацию магнитной составляющей электромагнитного поля при необходимости исследования магнитных характеристик.

В работах [11 – 20] приведены результаты исследований и разработок подобных структур. На рис. 1 приведены типовые конструкции РИП с коаксиальными зондовыми структурами.

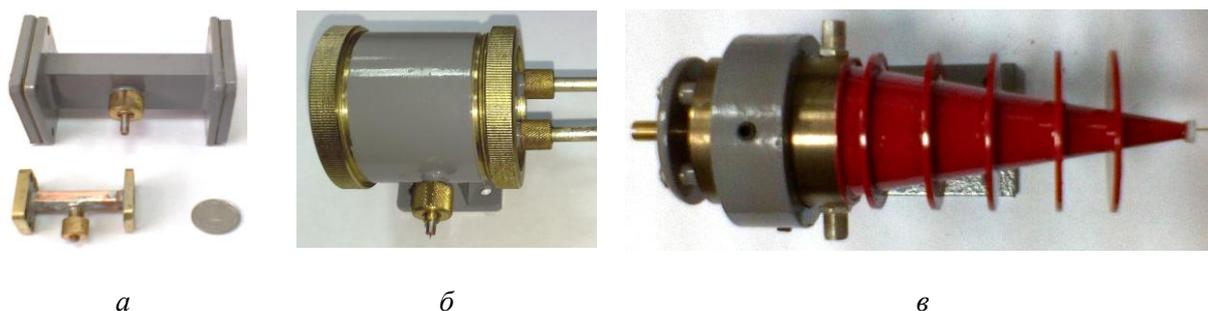


Рис. 1. Внешний вид микроволновых РИП:

а – на видах колебаний H_{10n} на основе отрезков регулярных волноводов с волноводными связями с измерительной системой; *б* – на виде колебаний H_{011} на основе цилиндрического объемного резонатора с коаксиальными связями; *в* – на виде колебаний квази- H_{111} на основе нерегулярной объемно-коаксиальной структуры с коаксиальными связями

Датчики, использующие в качестве первичного преобразователя резонансный измерительный преобразователь, позволяют связать изменение их резонансной частоты и добротности с изменениями соответственно неровности поверхности, диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь исследуемого объекта. Информационные сигналы в такой системе формируются на основе анализа измеренных значений изменений резонанс-

ной частоты и добротности РИП. При этом, чем выше добротность РИП, тем точнее измеряются изменения резонансной частоты и выше чувствительность к вносимым потерям.

Принцип действия резонансного измерительного преобразователя (РИП) основывается на формировании информационных сигналов в виде изменений его резонансной частоты и добротности, обусловленных характером взаимодействия электромагнитного поля с исследуемым объектом. Измерительная система с РИП функционально состоит из двух частей: собственно измерителя – датчика и системы формирования, регистрации и обработки информационных сигналов.

В зависимости от вида включения РИП в измерительную схему системы формирования, регистрации и обработки сигналов (отражательного или проходного) резонансная система датчика имеет один или два элемента связи плюс дополнительный конструктив для обеспечения апертурного или зондового взаимодействия.

В общем случае такая ситуация может быть описана набором соотношений:

$$Q_{\text{изм}} = Q_0 / \left(1 + \sum_i \beta_i \right), \quad (1)$$

$$Q_i = \omega_p \cdot W / P_i, \quad (2)$$

$$\beta_i = Q_0 / Q_{i.\text{вн}} = P_{\text{п.и.вн}} / P_{\text{п.р}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{изм}}$ – измеряемая или нагруженная добротность (в нашем случае – информационный сигнал); Q_0 – собственная (ненагруженная) добротность резонансной системы РИП; β_i – коэффициент i -й связи; ω_p – резонансная частота; W – энергия, запасаемая в резонансной системе; P_i – величина потерь в резонансной системе или во внешних цепях; $Q_{i.\text{вн}}$ – внешняя добротность для одного из элементов связи; $P_{\text{п.и.вн}}$ – величина потерь во внешней цепи одного из элементов связи; $P_{\text{п.р}}$ – величина потерь в резонансной системе.

Если рассматривать апертуру или зонд как неотъемлемую часть резонансной системы, то изменение параметров объекта диагностики будет приводить к изменению величины потерь $P_{\text{п.р}}$ в собственно резонансной системе РИП и, соответственно, к изменению собственной добротности (2) и коэффициентов связи β_i (3) с измерительной схемой. То есть, изменение измеряемой величины добротности будет происходить не только за счет изменения собственной добротности, обусловленной взаимодействием с объектом, но и за счет изменения величины коэффициентов связи (1).

Высказанные предположения экспериментально проверялись с помощью РИП на основе объемного резонатора, образованного из трехполуволнового отрезка прямоугольного волновода с элементами связи – диафрагмами на его торцах, внешний вид которого приведен на рис. 1, а свойства описаны в работах [12, 13].

Экспериментально исследовались зависимости величин коэффициентов связи от ширины индуктивной щели в диафрагмах при различных условиях на внешнем торце зондовой структуры (рис. 2). В качестве нагрузки зондовой структуры использовалась пластина из поликора ($d = 1$ мм, $\varepsilon \approx 9,6$; $\text{tg} \delta \approx 10^{-4}$).

Значения коэффициентов связи по входу β_1 и выходу β_2 определялись путем измерения соответствующих коэффициентов отражения $\Gamma_1(\omega_p)$ и $\Gamma_2(\omega_p)$ на резонансной частоте и расчетом по формулам:

$$\beta_1 = \frac{1 - \Gamma_1(\omega_p)}{\Gamma_1(\omega_p) + \Gamma_2(\omega_p)}, \quad (4)$$

$$\beta_2 = \frac{1 - \Gamma_2(\omega_p)}{\Gamma_1(\omega_p) + \Gamma_2(\omega_p)}. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) достаточно просто можно получить из соотношений, приведенных в работе [21]. Конструктивно диафрагмы связи в исследуемом резонаторе выполнялись по возможности идентичными для обеспечения условия $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, что позволяет упростить процесс измерений.

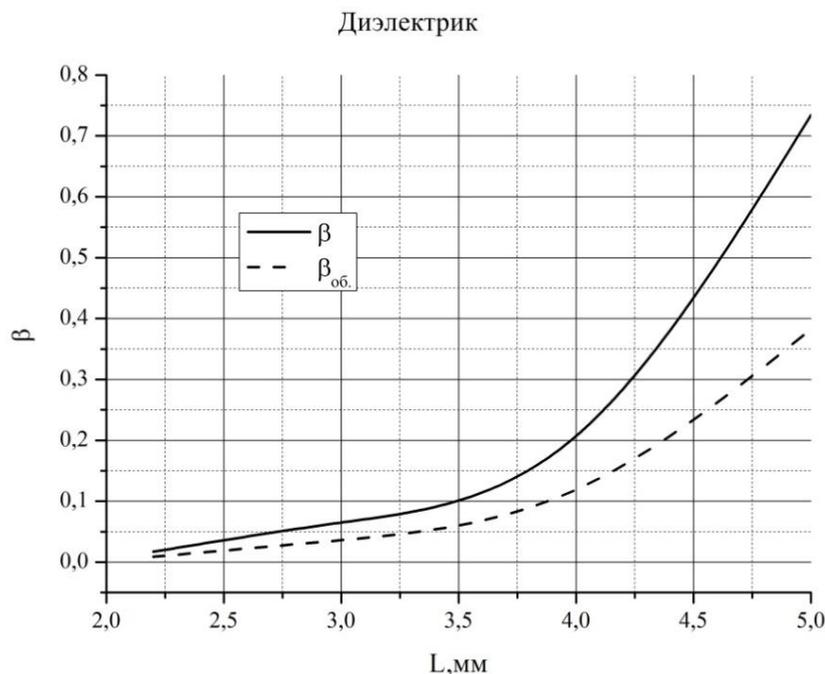


Рис. 2. Зависимость величины коэффициентов связи от ширины индуктивной щели при отсутствии и наличии диэлектрического образца на торце зонда

Графики на рис. 2 свидетельствуют, что величины коэффициентов связи будут по-разному меняться в зависимости от нагрузки зонда резонаторного измерителя, что приведет к искажению значения измеряемой величины нагруженной добротности (1).

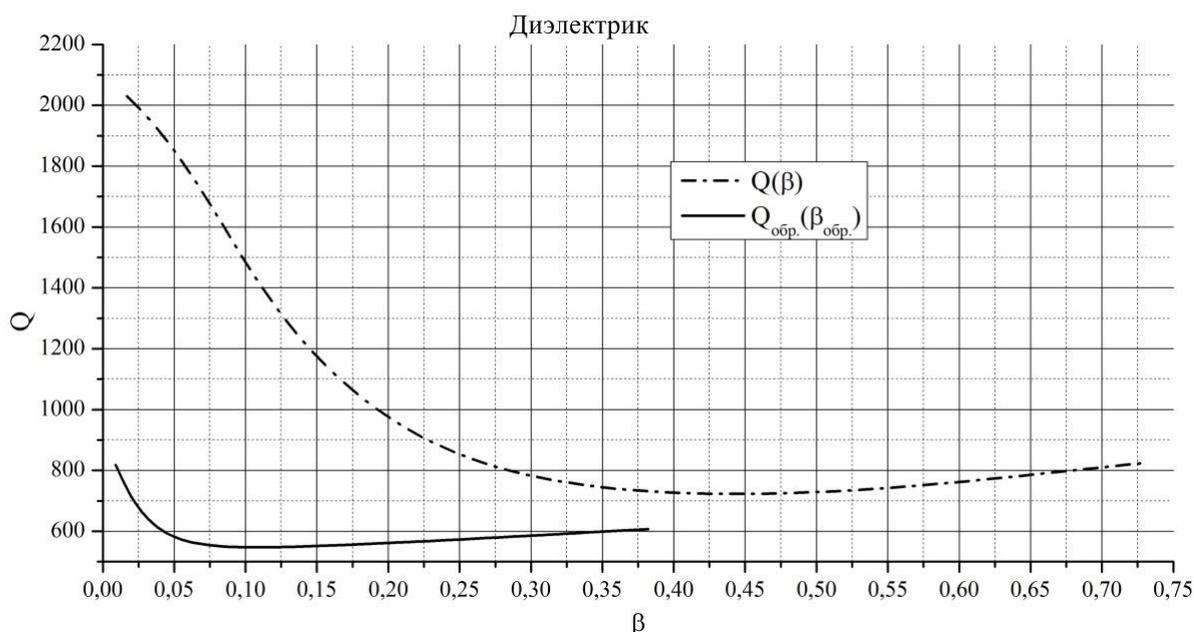


Рис. 3. Зависимости нагруженной добротности измерительного преобразователя от величины коэффициентов связи при различных нагрузках зондовой структуры

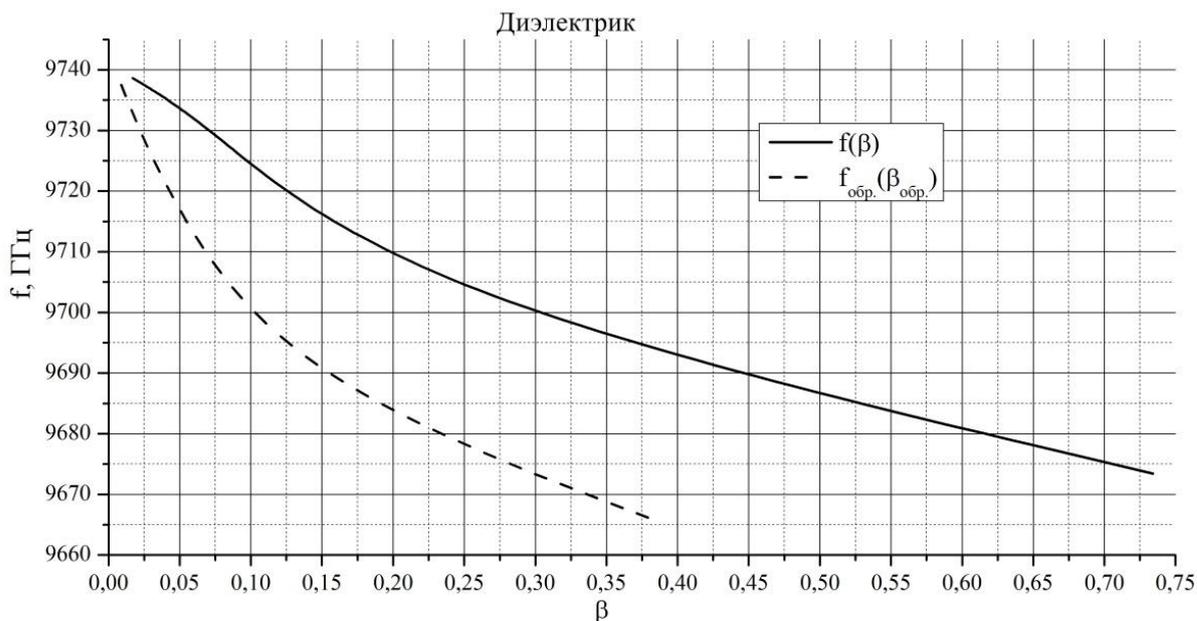


Рис. 4. Зависимости резонансной частоты измерительного преобразователя от величины коэффициентов связи при различных нагрузках зондовой структуры

Также исследовались зависимости нагруженной добротности и резонансной частоты от величины коэффициентов связи при различных нагрузках зондовой структуры (рис. 3, 4).

Видно, что полученные зависимости имеют различный характер изменения для нагруженного и ненагруженного измерительного преобразователя. Причем, если для зависимостей добротности объяснение может быть найдено из соотношений (1) – (3), для зависимостей резонансной частоты объяснение, по-видимому, следует искать в возможном изменении реактивной составляющей нагрузки зондовой структуры.

Выводы

Полученные результаты позволяют утверждать, что аналитические соотношения, которые используются для описания влияния параметров исследуемых объектов на добротность и резонансную частоту РИП и априори предполагают неизменность его связи с измерительной системой, на практике не соблюдаются.

Следовательно, при проведении таких измерений необходимо поддерживать величины связей неизменными, что требует дополнительных конструктивных и схемных усложнений, либо необходимо вводить в расчетные соотношения функции, учитывающие их изменение.

Список литературы:

1. Wei T. Scanning tip microwave near-field microscope / T. Wei, X.D. Xiang, W.G. Wallace-Freedman, P.G. Schultz // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 68, N 24. – pp. 3506-3508.
2. Gao C. High spatial resolution quantitative microwave impedance microscopy by scanning tip microwave near-field microscope / C. Gao, T. Wei, F. Duetter, Y. Lu, X.D. Xiang // Applied Physics Letters. – 1997. – Vol. 71, N 13. – pp. 1872-1874.
3. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління / Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич та ін. ; за ред. Я. І. Лепіха. – Одеса : Астропринт, 2011. – 352 с.
4. Лисовский, В.В. Теория и практика высокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. – Минск : УОБГАТУ, 2005. – 292 с.
5. Chen L.F. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization / L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.k. Varadan – John Wiley & Sons, Ltd, 2004. – 537 p.
6. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем : монографія / Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич та ін. ; за ред. Я. І. Лепіха. – Одеса : Астропринт, 2010. – 296 с.
7. Scanning Probe Microscopy: Electronic and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale / Edited by S. Kalinin, A. Gruverman. – Springer Science Business Media, LLC, 2007. – 980 p.

8. Nyfors E.G. Cylindrical microwave resonator sensors for measuring materials under flow. – Dissertation for degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki University of Technology, 2000. – 181 p.
9. Федюнин П.А. Микроволновая термовлагометрия / П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, А.А. Воробьев, В.Н. Чернышов ; под ред. П.А. Федюнина – Москва : Машиностроение-1, 2004. – 208с.
10. Слипченко Н.И. Физические основы ближнеполевой СВЧ диагностики материалов и сред : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.01 / Сумской государственный университет. – Сумы, 2008. – 351с.
11. Bondarenko I.N., Gordienko Yu. Ye., Slipchenko N. I. Biological objects parameters meter based on microwave microscope with coaxial resonant sensor // Proc. of the 10-th International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science” (TCSET 2010), Ukraine. Lviv-Slavske, Feb. 23-27, 2010.
12. Bondarenko I.N., Vasiliev Yu.S., Prokaza A.M. Analysis of resonant transducer characteristics for scanning microwave microscopy // Proc. of 21st International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2011), pp. 665–666.
13. Бондаренко И.Н. Измерительные преобразователи на основе резонансных волноводных регулярных структур / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.М. Проказа, С.И. Троицкий // Радиотехника. – Вып. 167. – С. 129-134.
14. Бондаренко И.Н. Измерительный преобразователь на основе цилиндрического резонатора на виде колебаний H_{011} / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.А. Камышан, С.И. Троицкий // Радиоэлектроника и информатика. – 2011. – № 2. – С. 3-5.
15. Bondarenko I.N. High-Q modes in irregular hybrid structures / I.N. Bondarenko, A.V. Galich, S.I. Troitski // Telecommunications and Radio Engineering. – 2013. – N 19. – P. 1747-1753.
16. Bondarenko I.N. Microstrip resonant sensors for scanning microwave microscopy / I.N. Bondarenko, A.V. Galich // Proc. of the 12-th International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science” (TCSET 2014), Ukraine. Lviv-Slavske, Feb. 25-March 1, 2014. – pp. 145-147. 1
7. Bondarenko I.N., Galich A.V., Troitski S.I. About some features of formation information signals of the resonance measuring converters // Proc. of 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2014). – P. 908-909.
18. Bondarenko I.N., Galich A.V. Microstrip resonant sensors // Proc. of 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2014), pp. 984-985.
19. Bondarenko I.N., Galich A.V. Measuring resonant transducers on the basis of microstrip structures // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – vol. 74, N 9. – P.807-814,.
20. Bondarenko I.N., Galich A.V. Resonant irregular hybrid structures // Proc. of the 13-th International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science” (TCSET 2016), Ukraine. Lviv-Slavske, Feb. 23-26, 2016. – P. 183-185.
21. Менде Ф.Ф. Сверхпроводящие и охлаждаемые резонансные системы / Ф.Ф. Менде, И.Н. Бондаренко, А.В. Трубицын – Киев : Наук. думка, 1976. – 272 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 11.09.2018