

УДК 621.372.413

Ю. Е. Гордиенко

РЕЗОНАНСНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ДИАГНОСТИКЕ МИКРОСЛОИСТЫХ СТРУКТУР

В исследованиях взаимодействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона с естественными и искусственными средами можно выделить два направления. Одно связано с резонансными эффектами (ЭПР, ФМР, циклотронный резонанс и др.). Второе включает исследование свойств в широком диапазоне частот. Прикладные аспекты второго направления также весьма разнообразны: от изучения явлений на молекулярном уровне до модификаций и диагностики микросред. Если ограничиться только диагностическим разделом, то в нем по аппаратурному признаку также можно выделить два направления, базирующихся на резонансных и нерезонансных измерительных преобразователях (датчиках). Бесспорным преимуществом последних является возможность исследований в диапазоне частот без существенной реконструкции технического средства.

Цель данной статьи — попытка определить и обобщить преимущества резонансных измерительных преобразователей (ИП) в диагностике микрослоистых сред. Такая задача не покажется тривиальной, если сравнить объем исследований по резонансным и нерезонансным ИП [1—4].

К микрослоистым средам можно отнести широкий класс объектов, включающих, в том числе, высокополимеры, биосреды, композитные материалы, эпитаксиальные структуры для микроэлектроники, терморadiационно-стойкие оболочки и др. В целом это многослойные объекты, взаимодействие которых с электромагнитными волнами и колебаниями определяется толщиной, взаимным расположением, электрическими и магнитными параметрами слоев. Диагностика их фактически означает многопараметровый послойный контроль, специфическими особенностями которого являются требования по неразрушаемости и высокой локальности [4, 5].

1. Общие формулировки и оценки

Резонансные ИП в диапазоне частот до 10 ГГц можно разделить на вихретоковые, емкостные и резонаторные. В первых двух четко выделяется взаимодействие объекта отдельно с магнитным или электрическим полем колебаний соответственно. В третьей разновидности взаимодействие носит общий характер с возможным преобладанием электрической или магнитной компоненты (ИП Н и Е-типа [6]).

Основными выходными сигналами измерительной информации являются изменение добротности $\Delta Q/Q$ и резонансной частоты $\Delta f/f_0$ ИП, связанные с влиянием объекта. Многопараметровость диагностики достигается за счет обеспечения многофакторности и изменения условий взаимодействия. Например, исследование в силовых электрических, магнитных, механических и других полях; при термо-, фото- и радиационном воздействии и т. п.

Улучшение метрологических показателей может достигаться формированием производных от указанных выше выходных сигналов измерительной информации. Например, изменение коэффициента передачи (отражения) ИП, фазовый сдвиг прошедшей (отраженной) волны и др.

Вопросы неразрушаемости и локальности контроля решаются, соответственно, наружным расположением объекта и специальной концентрацией полей в апертуре измерительного отверстия, через которое исследуемый объект воздействует на резонансное колебание ИП.

Качественные представления о взаимосвязи чувствительности и локальности ИП при диагностике микрослоистых сред получаются из анализа достаточно общего выражения относительного изменения его добротности

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 1 - \left(1 + \frac{\Delta f}{f_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta W}{W_{30}}\right) \left(1 + \frac{\Delta P_c}{P_c} + \frac{P_{обр}}{P_c}\right)^{-1}, \quad (1)$$

где $\Delta f/f_0$ — относительное изменение резонансной частоты ИП, вызванное влиянием объекта;

$\Delta W/W_{30}$; $\Delta P_c/P_c$ — соответствующее изменение запасаемой энергии и мощности собственных потерь в ИП;

$P_{обр}$ — мощность потерь в объекте.

Практика и последующие теоретические обобщения показывают, что обычно $\Delta f/f_0 \approx \Delta W/W_{30} \ll 1$; $\Delta P_c/P_c \ll 1$. Следовательно, достаточно очевидным представляется общее заключение: для достижения практически приемлемой чувствительности ИП по этому сигналу измерительной

информации необходимо выполнение условия $P_{обр} > P_c$. Если ввести понятие коэффициента включения объекта в поле резонансного ИП

$$\eta = \frac{\int_{V_{обг}} \epsilon''(\mu'') E E^* (H H^*) dV}{\int_V \epsilon'(\mu') E E^* (H H^*) dV}, \quad (2)$$

то указанному соотношению можно придать определенный количественный вид $Q_0 \eta \gg 1$. В знаменателе (2) предполагается интегрирование по всему объему поля ИП.

Ограничение на соотношение $Q_0 \eta \gg 1$ накладывают два фактора: снижение добротности ИП воздействием образца до предела, при котором ИП перестает фактически быть резонансным, и ограниченность возможности одновременно повысить локальность контроля. Последняя определяется объемом интегрирования в числителе (2).

При диагностике однослойных объектов решение этой компромиссной задачи находится на путях снижения собственных потерь в ИП и концентрации поля в его измерительной апертуре. При многопараметровой диагностике многослойных структур кроме этих направлений следует использовать еще и перераспределение поля в слоях за счет его продольных особенностей в апертуре.

Изменение резонансной частоты ИП $\Delta f/f_0$ также важный выходной сигнал измерительной информации. При его формировании и обработке справедливы те же рекомендации, что и для $\Delta Q/Q$.

Из опыта современных разработок в рассматриваемой области следует, что определенный выигрыш в достижении максимального отношения сигнал/шум по обоим выходным сигналам дает применение автодинного способа их формирования [8, 9]. В связи с этим вопросы оптимизации связи ИП с ВЧ питающей и детектирующей цепями приобретают специфический по сравнению с традиционным рассмотрением смысл [9].

Во всех случаях, по-видимому, следует отказаться от прямых измерений добротности и амплитуды колебаний на контуре, поскольку предельная чувствительность и разрешающая способность контроля непосредственно связаны с погрешностью оценки этих сигналов. Применение высокоточных способов измерения добротности существенно усложнит технические средства контроля. Погрешность оценки амплитудного сигнала в значительной мере определяется стабильностью режима ВЧ генератора и воспроизводимостью характеристик ВЧ детектора. В связи с отмеченным

представляется перспективным формирование связанного с $\Delta Q/Q$ выходного сигнала модуляционным методом [5, 13].

2. Основные теоретические соотношения

Теория вихретоковых [10], емкостных [13] и СВЧ-резонансных ИП [4—6, 11, 12, 15] развивалась отдельно. Несмотря на вытекающую из физических явлений общность процессов, определяющих сигналы измерительной информации, в настоящее время вряд ли существует настоятельная необходимость создания общей теории. Такая потребность может возникнуть при переходе к ИП на основе полосковых или щелевых резонансных элементов [17]. Строгое решение полной электродинамической задачи для них, по-видимому, станет основой такой теории. Сейчас представляется допустимым ограничиться только лишь изложением важных, на наш взгляд, достижений в каждой отдельной области.

Специфика теории СВЧ-резонансного апертурного ИП заключается в наличии условия на бесконечности и особенностей на ребре в возникающих краевых задачах электродинамики. Применение аппарата функций Грина [14, 15], по нашему мнению, во всех практически интересных случаях улучшает обусловленность прямых численных методов решения таких задач.

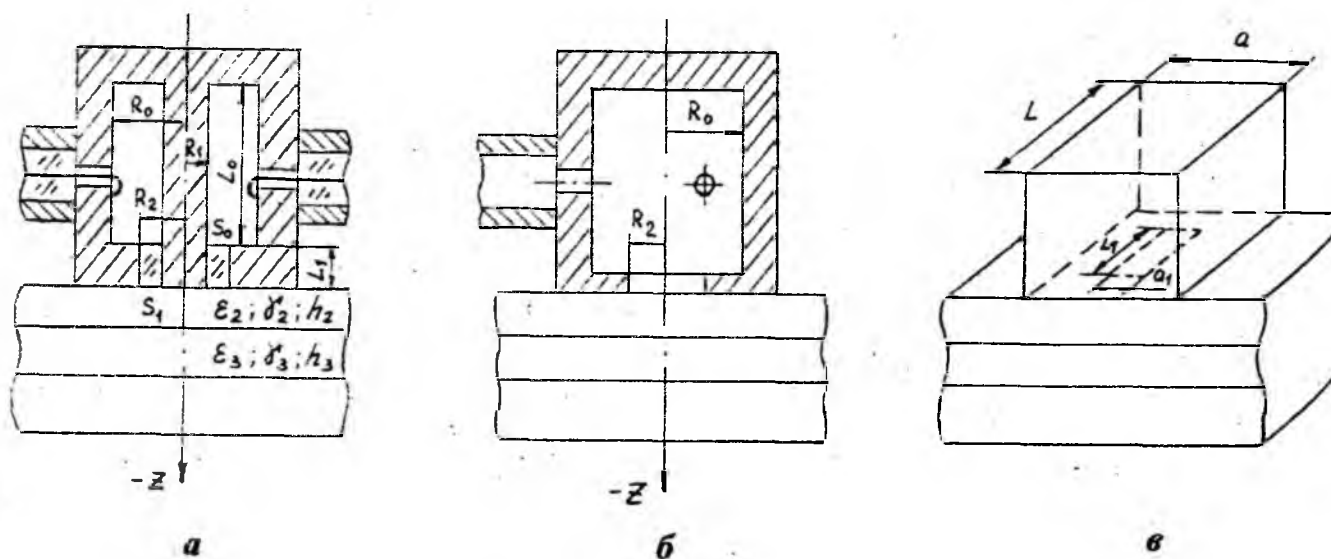


Рис. 1. Схематическое изображение резонансных ИП

Рассмотрение представленных на рис. 1 схематических моделей охватывает практически все известные СВЧ-апертурные резонаторные ИП для неразрушающей диагностики микрослоистых структур.

Построенное по методике, изложенной в [15], решение задачи

о зависимости добротности и резонансной частоты от параметров диагностируемой структуры сводится к интегральным уравнениям вида

$$\int_{S_0} [\epsilon_1 G_1(s_1 L_1 - 0; s'_1 L_1 - 0) + \epsilon_0 G_0(s_1 L_1 + 0; s'_1 L_1 + 0)] \psi_0(s') ds' = 0; \quad (3)$$

$$[\epsilon_1 G_1(s_1 + 0; s'_1 + 0) + \epsilon_2 G_2(s_1 - 0; s'_1 - 0)] \psi_1(s') ds' = 0,$$

где $G_{0,1,2}$ — составляющие тензорных функций Грина для различных областей, участвующие в определении тангенциальных компонент поля по обе стороны отверстий S_0 и S_1 ;

ψ_0 и ψ_1 — неизвестные функции из класса определяемых условиями типа Мейкснера, посредством которых можно описать поле на отверстиях S_0 и S_1 .

Конкретные выражения G_0 , G_1 и G_2 определяются типом ИП и рабочим видом колебаний в нем. В частности, для цилиндрических резонаторных ИП с аксиальной симметрией измерительного отверстия и рабочими видами колебаний H_{011} , E_{021} и ТЕМ их можно представить следующим рядом:

$$G_{0,1} = \sum_{n=0}^{\infty} F_{0,1}(\kappa_n) \psi_{0,1}(\kappa_n \frac{r}{R_{0,1}}) \psi(\kappa_n \frac{r'}{R_{0,1}}) g_{0,1}(\kappa_n L_{0,1}); \quad (4)$$

$$G_2 = - \int_0^{\infty} \frac{1-y_2}{1+y_2} \frac{\epsilon_2}{\delta_2} J_1(\kappa r) J_1(\kappa r') \kappa d\kappa, \quad (5)$$

где $\psi_{0,1}(r)$ и $\psi_{0,1}(r')$ — поперечные составляющие собственных функций Грина соответствующих координатных областей ИП; $F_{0,1}$ — нормирующие множители; $g_{0,1}$ — значения продольных составляющих на границах S_0 и S_1 .

Для H_{011} , E_{021} и ТЕМ колебаний функции $G_{0,1}$ имеют свой вид, устанавливаемый, например, с помощью соотношений работы [18].

Исследования показывают, что сходимость такого ряда во всех случаях рассматриваемых ИП контролируется произведением $\psi_{0,1}(r) \psi_{0,1}(r')$, а при $r \rightarrow r'$ ряд вообще расходится. Выделяя плохо сходящуюся часть и находя главный член асимптотики при $\kappa_n \rightarrow \infty$, можно (4) представить в виде

$$G_{q1} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left| 2 \sin \frac{\pi(r-r')}{2(\tilde{R}-1)\tilde{R}_0} \right| - \ln \left[2 \sin \frac{\pi}{2(\tilde{R}-1)} \left(\frac{r+r'}{\tilde{R}_0} - 2 \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\cos \frac{n\pi}{(\tilde{R}-1)} \left(\frac{r}{\tilde{R}_0} - 1 \right) \cos \frac{n\pi}{(\tilde{R}-1)} \left(\frac{r'}{\tilde{R}_0} - 1 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + F_{q1}(\chi_n) \Psi_{q1}(\chi_n r) \Psi_{q1}(\chi_n r') g(\chi_n, L_{q1}) \right] \right\}, \quad (6)$$

где $\tilde{R} = R_0/R_1$ и $\tilde{R} = R_1$ для рис. 1, а;
 $\tilde{R} = 5$ и $\tilde{R} = R_0$ для рис. 1, б.

Второе слагаемое в (6) отражает логарифмический характер особенностей этих функций, выделенный в явном виде.

Функция $G_2(s_1, s'_1)$ описывает диагностируемый объект. При его слоистой структуре для универсализации и компактности ее представления в [15] показано использование рекуррентных соотношений.

$\mathcal{Y}_2$ — функция параметров слоистой среды, приведенной по указанным рекуррентным соотношениям к первому слою.

Как и в рассмотренном выше случае интеграл имеет невысокую сходимость и особенность в точках $r = r'$. Осуществляя похожую по методике процедуру, его можно представить в виде

$$G_2 = -2 \int_0^{\infty} \frac{\epsilon_2}{\delta_2} \frac{J_1(\kappa r) J_1(\kappa r')}{1 + \mathcal{Y}_2} \kappa d\kappa + \\ + \int_0^{2\pi} \frac{e^{j\kappa_2 \sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \psi}} - 1}{\sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \psi}} \cos \psi d\psi + \frac{4}{r' + r} (1D - 1B), \quad (7)$$

где ϵ_2, δ_2 — относительная диэлектрическая проницаемость и постоянная распространения $\delta_2 = (\epsilon_2^2 - k_2^2)^{1/2}$ в первом слое: $J_1(\kappa r)$;

$J_1(\kappa r')$ — функции Бесселя;

$1D, 1B$ — эллиптические интегралы вида

$$ID = \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^2 \psi d\psi}{\sqrt{1 - v^2 \sin^2 \psi}} ; \quad IB = \int_0^{\pi/2} \frac{\cos^2 \psi d\psi}{\sqrt{1 - v^2 \sin^2 \psi}} ;$$

$$v = \frac{2\sqrt{rr'}}{\sqrt{r+r'}} . \quad (8)$$

В выражении (7) первые два интеграла хорошо сходящиеся и легко вычисляются одним из способов численного интегрирования. Эллиптические интегралы ID, IB имеют при $r \rightarrow r'$ главную особенность логарифмического типа, подобную указанному выше ряду в выражении (6).

Выделение указанных особенностей в явном виде позволяет в поставленной задаче перейти к следующему интегральному уравнению.

$$\int_{R_1}^{R_2} \ell_n \left| \frac{r-r'}{R_1} \right| \varphi(r') dr' + \int_{R_1}^{R_2} \left[\tilde{G}_2(r, r') \Big|_{z=+0} + \tilde{G}_{0,2}(r, r') \Big|_{z=0} \right] \varphi(r') dr' = 0, \quad (9)$$

где $\tilde{G}_{0,2} = -\ell_n \left| \frac{r-r'}{R_1} \right| + G_{0,2}$.

Функция $\varphi(r')$ для удовлетворения условий Мейкснера может быть представлена в виде

$$\varphi(r') = \frac{\tilde{\varphi}(r')}{\sqrt{(r' - R_1)(R_2 - r')}} , \quad (10)$$

где $\tilde{\varphi}(r')$ — непрерывная по Гальдеру на замкнутом интервале $[R_1, R_2]$ функция.

Далее, используя разложение $\ell_n \left| \frac{r-r'}{R_1} \right|$ и $\varphi(r')$ в ряд по полиномам Чебышева I рода и свойство ортогональности этих полиномов, интегральное уравнение вида (9) сведем к бесконечной СЛАУ I рода. В отличие от алгебраического представления рассматриваемой задачи в работе [15] через СЛАУ I рода, предложенный здесь подход делает ее решение хорошо обусловленным, а его численную реализацию быстро сходящейся.

В итоге характеристическое уравнение для определения зависимости добротности и резонансной частоты ИП от параметров объекта исследования строится из условия равенства нулю определителя СЛАУ II рода. Несмотря на предпринятые меры, позволившие уменьшать практически используемую размерность определителя и рядов, образующих его элементы, процедура численного исследования корней остается сложной и требует значительных вычислительных мощностей. Поэтому такая теория обычно применяется для абсолютной калибровки и оценки систематической погрешности более простых математических моделей.

В частности, нами для исследования и оптимального синтеза ИП на основе цилиндрических резонаторов с E_{022} или H_{012} видом рабочих колебаний (см. рис. 1, б) широко использовано так называемое одномодовое приближение [5, 6].

Характеристические уравнения при этом принимают вид

$$\operatorname{th} \gamma_1^{E,H} L = (\gamma^{E,H})^{-1}, \quad (11)$$

где
$$\gamma^{E,H} = \gamma_{1,2}^{E,H} \frac{1 + \gamma_{2,3}^{E,H} \operatorname{th} \gamma_2 h_2}{\operatorname{th} \gamma_2 h_2} \frac{\operatorname{th} \gamma_3 h_3 + \gamma_{3,4}^{E,H}}{1 + \gamma_{3,4}^{E,H} \operatorname{th} \gamma_3 h_3} \dots$$

$$\gamma_{1,2}^E = -\frac{\epsilon_2 \gamma_1}{\gamma_2}; \quad \gamma_{1,2}^H = -\frac{\gamma_2}{\gamma_1}; \quad \gamma_{2,3}^E = \frac{\epsilon_2 \gamma_3}{\epsilon_3 \gamma_2}; \quad \gamma_{2,3}^H = \frac{\gamma_2}{\gamma_3} \quad \text{и т. д.}$$

Представленное приближение дает высокую точность оценок при условии, что слоистый объект полностью перекрывает поперечное сечение ИП (т. е. $R_2 = R_0$). При $R_2 < R_0$ можно вводить постоянный множитель, учитывающий соотношения R_2/R_0 , если исследуется тонкослойный экранируемый с противоположной стороны слоистый объект.

Для исследования резонаторных ИП с укорачивающей емкостью, образованной измерительным щелевым отверстием (см. рис. 1, а), часто используется квазистатическое приближение [4, 12]. Изменение добротности и частоты ИП при этом описывается через вносимую объектом емкость

$$C_{\text{вн}} = C' + jC'' = \frac{2\epsilon_0 R_0}{\ln(R_2/R_1)} \int_0^\infty \frac{J_0(kR_1) - J_0(kR_2)}{k} J_1(kR_1) \gamma^E dx. \quad (12)$$

Анализ высокочастотных вихретоковых и емкостных резонансных ИП будем производить, используя теоретические соотношения работ [4, 10-12] с преломлением их к резонансному колебательному контуру.

Комплекс приведенных соотношений позволяет осуществить численные исследования различных ИП в широком диапазоне рабочих частот, параметров структуры и изменения геометрии взаимодействия. Учет влияния воздействующих факторов при изотропном их проявлении осуществим через параметры объекта в выражениях $\chi^{E, H, TEM}$. При анизотропии соответствующих свойств объектов необходимо дополнительное теоретическое рассмотрение. Чаще всего при этом допустимо ограничиться методом малых возмущений.

3. Сравнение характеристик преобразования различных ИП

Под понятием характеристик преобразования в первую очередь подразумевается зависимость выходного сигнала измерительной информации от измеряемого параметра объекта. При более широкой его трактовке предполагается учет влияющих факторов.

Рассмотрим вначале диапазонные особенности характеристик преобразования различных ИП на примере весьма распространенного случая измерения электропроводности (или $tg \delta_2$) однослойного объекта. На рис. 2 приведены такие характеристики СВЧ ИП H_{012} (рис. 1, б), емкостного (рис. 1, а) и вихретокового типов для режимов их работы, близких к оптимальным по отдельным критериям.

Например, рабочая частота H_{012} ИП выбрана в области 35...40 ГГц для одновременного обеспечения приемлемых размеров и высокой собственной добротности.

Геометрия и рабочая частота емкостного ИП выбраны из условия уменьшения влияния высших типов колебаний, приемлемой точности реализации геометрии и высокой добротности.

Вихретоковые ИП рассматривались в широком диапазоне рабочих частот.

Характеристики преобразования рассчитывались с ориентацией на реально достижимое значение собственной добротности. Однако некоторая свобода выбора этой величины была использована для уравнивания $(\Delta Q/Q)_{max}$ у всех ИП.

При диагностике неэкранирующих объектов ИП Н-типа позволяют реализовать широкий диапазон измерений $tg \delta_2$ для различных h_2 с высокой чувствительностью путем оптимального выбора зазора между объектом и отдельным металлическим экраном. Этот зазор определяет степень

включения объекта в СВЧ-поле ИП и на рис. 2 он количественно учтен значением $\beta_0 h_0$. Основным их преимуществом по сравнению с ИП емкостного типа является слабое влияние зазора между объектом и ИП. (Этот фактор, как показано ниже, весьма существенно сказывается на погрешности емкостных и вихретоковых ИП).

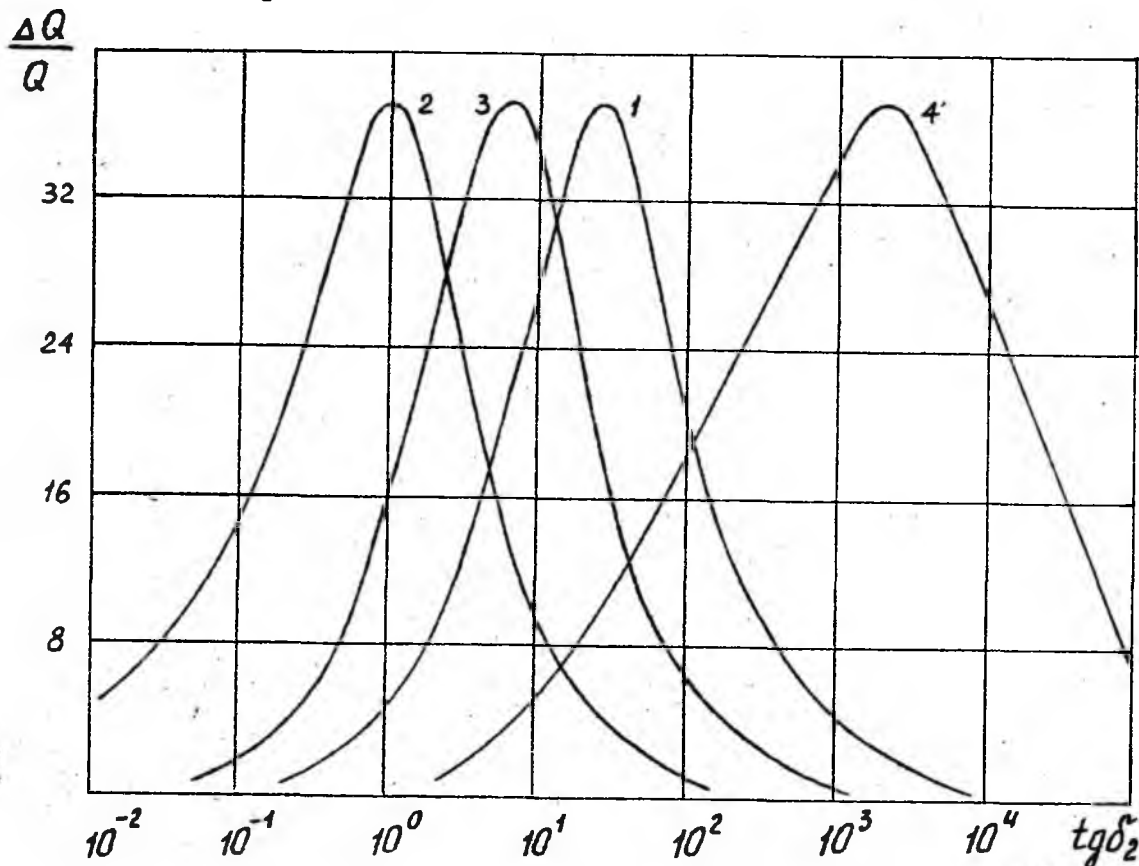


Рис. 2. Характеристики преобразования различных ИП: 1 — H_{012} ИП; $\beta_0 h_0 = 0$; 2 — H_{012} ИП; $\beta_0 h_0 = 0,1$; 3 — ИП емкостного типа ($f_0 = 0,5$ ГГц); 4 — ИП вихретокового типа ($f_0 = 37,5$ ГГц)

Кроме того, возможность изменять в широких пределах степень включения объекта (то есть параметр η) выбором $\beta_0 h_0$ позволяет практически в любом диапазоне $\text{tg} \delta_2$ (или y'' для многослойной среды) реализовывать сравнимую чувствительность на заданной рабочей частоте. Следовательно, с помощью одного конструктивно не изменяемого ИП, работающего на заданной частоте, можно измерять $\text{tg} \delta$ материалов в диапазоне $10^{-4} \dots 10^5$ при вариации толщины слоев $\beta_2 h_2$ от 10^{-2} до $3,0$. В случае емкостных и ВЧ вихретоковых ИП такая возможность существенно более ограничена. Вместе с тем емкостные ИП имеют значительно более высокую чувствительность при диагностике микрослоистых структур на проводящих и сильно легированных полупроводниковых подложках. Этот вопрос достаточно широко освещен в [4, 11, 12].

Диапазон измерения $\operatorname{tg} \delta$, перекрываемый ИП этого типа, меньше по сравнению с H_{012} ИП и практически составляет $10^{-1} \dots 10^3$. Следует отметить, что для обеспечения широких пределов измерения электропроводности полупроводников (от 10^{-5} до $10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) необходимо изменять рабочую частоту СВЧ емкостного ИП от $5 \cdot 10^3$ Гц до 10^{10} Гц. Это сопряжено с трудностями аппаратного плана и потребностью в наборе отдельных ИП на каждую рабочую частоту. Однако весьма важным достоинством такого ИП является возможность достижения высокой локальности измерений (порядка 5 мм^2).

Вихретоковые ИП эффективны для диагностики сильно легированных полупроводниковых пластин и слоев с поверхностным сопротивлением менее $1 \text{ Ом}/\square$. Основная область их применения — измерение поверхностного сопротивления проводящих слоев [1, 10]. Однако для диагностики резистивных слоев с поверхностным сопротивлением более $10 \text{ Ом}/\square$, а также для раздельного измерения толщины и электропроводности слоев вихретоковые ИП практически не применяются.

Анализ показывает, что этот пробел хорошо восполняется H_{012} ИП, который можно представить аналогом вихретокового ИП на СВЧ. При соотношении толщины проводящей пленки и глубины скин-слоя в материале $h_2/\delta_2 < 1$ характеристика такого ИП на частотах 30...60 ГГц располагается в области значений поверхностного сопротивления от 1 до $10 \text{ Ом}/\square$ и может управляться выбором величины $\beta_0 h_0$.

Выходные сигналы измерительной информации, связанные с изменением резонансной частоты резонаторных ИП, в большей степени ориентированы на оценку толщины слоев. Соотношение характеристик преобразования рассматриваемых ИП по этому параметру приблизительно такое же, как и для $\Delta Q/Q$ за исключением вихретокового. Для него зависимость имеет такой же характер, как и от $\operatorname{tg} \delta$, и раздельное определение толщины и электропроводности слоев на одной частоте практически невозможно.

4. Некоторые особенности осуществления диагностики микрослоистых структур

При осуществлении радиоволновой диагностики микрослоистых объектов весьма важной является задача исключения влияния зазора между ИП и объектом на результаты измерений. СВЧ ИП Н- и Е-типа разрабатывались преимущественно с учетом необходимости ее разрешения [5, 16]. Поэтому измерительное отверстие, как правило, выполняется по линии СВЧ-тока (лучше нулевого тока). Емкостные и вихретоковые ИП практически невозможно выполнить с исключением влияния зазора. Поэтому указанная

проблема решается аппаратно [1—4, 10]. На рис. 3 представлены в относительных единицах зависимости $\Delta Q/Q$ от величины зазора для различных ИП. Зависимости $\Delta f/f$ имеют практически такой же характер, если выполняется условие $Q\eta \gg 1$. Следовательно, комбинированный выходной сигнал измерительной информации типа обобщенной расстройки резонансного ИП исследуемым образом должен значительно меньше зависеть от вариации величины зазора. В ряде случаев более удобно выделять отношение сигналов, связанных с $\Delta Q/Q$ и $\Delta f/f$, которое зависит от $\operatorname{tg} \delta$ и инвариантно в некоторых пределах к изменению величины зазора.

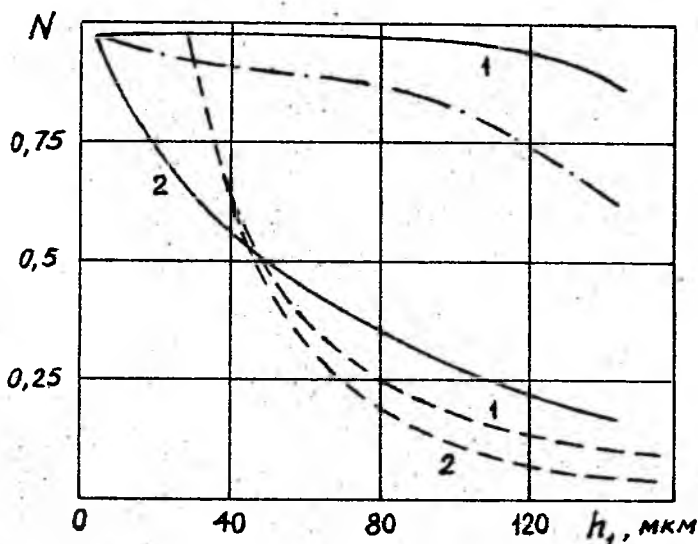


Рис. 3. Влияние зазора на изменение выходного сигнала различных ИП:

- 1 — H_{012} ИП; 2 — ИП вихретокового типа;
 - - - - - ИП емкостного типа; 1 — $\operatorname{tg} \delta_2 = 0,3$; 2 — $\operatorname{tg} \delta_2 = 30$;
 ····· E_{022} ИП

Указанная задача является, по сути, частью общей проблемы осуществления многопараметрового контроля многослойных объектов аппаратно комплектными средствами. Для одного рабочего ИП это фактически означает формирование набора выходных сигналов измерительной информации, не являющихся линейной комбинацией сигналов $\Delta Q/Q$ и $\Delta f/f$, или от их производных. Определенные возможности в этом плане предоставляет модуляционный метод диагностики [5].

Вид характеристик на рис. 2 свидетельствует о том, что на основе всех рассматриваемых ИП его можно реализовать.

Сущность модуляционного метода сводится к выделению сигнала на СВЧ-детекторе, связанного с периодической модуляцией какого-либо

параметра объекта. Самое широкое распространение получило использование явления фотопроводимости для безэлектродного измерения ряда параметра полупроводниковых материалов. Наряду с измерением времени жизни носителей по кинетике релаксации фотопроводимости стали развиваться методы измерения удельного сопротивления по абсолютной величине сигнала фотопроводимости при СВЧ-питании образца в поле резонаторного ИП. Однако наибольший интерес при многопараметровом контроле вызывает возможность формирования выходных сигналов, независимых от глубины модуляции. Здесь наиболее эффективным представляется H_{012} ИП. СВЧ-модуляционный метод диагностики при этом основывается на выделении отношения сигналов, связанных с модуляцией электрических параметров объекта, при различном значении $\beta_0 h_0$.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, из-за существенного влияния модуляции на перераспределение поля в таком резонаторе модуляционная характеристика нелинейна по параметру $\beta_0 h_0$. В результате отношение при различных $\beta_0 h_0$, будучи независимым от глубины модуляции и условий выделения и обработки, зависит только от контролируемых параметров объектов. Выбором соответствующей пары $\beta_0 h_0$ можно изменять чувствительность по заданному параметру.

Модуляционные методы могут базироваться также на периодическом изменении зазора между образцом и ИП; апертуры ИП; экранирования СВЧ прозрачного образца.

Приведенный здесь неполный анализ различных резонансных ИП дает основание говорить о их высокой эффективности при многопараметровой диагностике многослойных микроструктур. Использование комбинации ИП различного типа, а также различных выходных сигналов, включая модуляционные, уже в настоящее время может обеспечить диагностику двух- и трехслойных объектов по нескольким параметрам (например, толщина, электропроводность, параметры подвижных носителей заряда).

Л и т е р а т у р а: 1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — М., 1986. — Т. 1, 2. — 485 с. 2. Арапов Ю. Г., Давыдов А. В. Волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводников на СВЧ: Обзор // Дефектоскопия. — 1978. — № 11. — С. 63—87. 3. Матис И. Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. — Рига, 1977. — 255 с. 4. Неразрушающие бесконтактные СВЧ-резонаторные методы локального контроля полупроводниковых материалов: Обзор / Ахманов В. Б., Детинко В. М., Медведев Н. В. и др. // Дефектоскопия. — 1986. — № 1. — С. 23—35. 5. Гордиенко Ю. Е. СВЧ-диагностика слоистых

полупроводниковых материалов: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Харьков, 1984. — 397 с. 6. *Гордиенко Ю. Е.* Определение характеристик объемных резонаторов со слоистым заполнением // Радиотехника. — 1982. — Вып. 60. — С. 17—23. 7. *Григулис Ю. К.* Электромагнитный метод анализа слоистых полупроводниковых и металлических структур. — Рига, 1970. — 270 с. 8. *Гордиенко Ю. Е., Овчаренко Л. А.* Автодинный измеритель толщины полупроводниковых пленок // Зав. лаб. — 1984. — № 7. — С. 36—38. 9. Общие характеристики и особенности автодинного эффекта в автогенераторах /Е. М. Гершензон, Б. Н. Тумаков, В. Т. Бузыкин и др. // Радиотехника и электроника. — 1982. — № 1. — С. 104—112. 10. *Соболев В. С., Шкарлет Ю. М.* Накладные и экранные датчики. — Новосибирск, 1967. — 140 с. 11. *Детинко М. В., Нечаев А. И.* Расчет П-образного коаксиального резонатора, заполненного плоскостойкой средой с потерями // Радиотехника и электроника. — 1985. — Т. 30. — № 5. — С. 1066—1071. 12. СВЧ-резонаторный метод измерения удельного сопротивления и толщины эпитаксиальных пленок /Г. Н. Данилов, М. В. Детинко, Н. В. Медведев // Электрон. техника. Сер. 1. — 1982. — Вып. 6 (342). — С. 16—19. 13. *Воробейчиков Э. С., Наливайко Б. А.* Фотомодуляционный бесконтактный метод измерения удельного сопротивления высокоомных пленок // Электрон. техника. Сер. 8. — 1971. — № 1 (7). — С. 39—43. 14. *William A. C.* The resonant frequency and tuning characteristics of a narrow — gap reentrant cylindrical cavity // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique. — 1976. — V. 24. — N 4. — P. 182—187. 15. *Гордиенко Ю. Е., Овчаренко Л. А.* Характеристики объемных СВЧ-резонаторов, апертурно нагруженных слоистой полупроводниковой средой // Радиотехника. — 1988. — Вып. 85. — С. 54—63. 16. *Champlin K. S., Glover G. H.* Influence of waveguide contact on measured complex permittivity of semiconductors // Journ. of Applied Physics. — 1966. — V. 37. — N 6. — P. 2355—2360. 17. *Сидорин В. В.* Метод неразрушающего контроля удельного сопротивления полупроводниковых материалов // Зав. лаб. — 1988. — № 9. — С. 64—67. 18. *Панченко В. А.* Тензорные функции Грина уравнений Максвелла для цилиндрических областей // Радиотехника. — Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1970. — Вып. 5. — С. 82—91.