

Ю. Е. ГОРДИЕНКО, д-р физ.-мат. наук, А. И. КОЧЕРЖИН, А. В. ПАШКОВ,
А. А. РЯБУХИН, канд. физ.-мат. наук

МОДУЛЯЦИОННЫЕ ВАРИАНТЫ СВЧ-ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ И СРЕД

При СВЧ-диагностике материалов и сред существенной является проблема исключения или подавления влияния мешающих факторов. Наиболее часто фигурируемыми из них являются невоспроизводимость геометрии и плотности образца, степени включения образца в электромагнитное поле СВЧ-измерительного преобразователя (ИП), характеристики преобразования СВЧ-детектора; нестабильность температуры окружающей среды, мощности и частоты задающего СВЧ-генератора.

В большинстве случаев выделяются преобладающие по влиянию на традиционные сигналы измерительной информации мешающие факторы и решаются вопросы их учета в модели диагностики [1] или полного исключения [2]. Однако накопленный опыт уже позволяет системно подходить к решению указанной проблемы. Одним из вариантов такого подхода является разработка модуляционных методов СВЧ-диагностики.

Существует несколько их вариантов. Одни из них базируются на модуляции параметров объекта диагностики, например, СВЧ-фотомодуляционный метод диагностики полупроводниковых материалов [3]. Другие – на модуляционных принципах выделения стандартных сигналов измерительной информации, например, измерение добротности и резонансной частоты СВЧ-резонаторного ИП [4].

В работе обсуждается развитие этих и других подходов, повышающих эффективность подавления влияния мешающих факторов с расширением их перечня. Основным в концепции такого развития является формирование комбинированных сигналов измерительной информации.

Рассмотрим наиболее простой вариант, ориентированный в первую очередь на подавление таких факторов, как невоспроизводимость плотности вещества пробы и степени включения ее в электромагнитное поле ИП. Для СВЧ-РИП качественное рассмотрение можно осуществить, оперируя соотношениями теории малых возмущений [5]. Вызванные внесением образца в электромагнитное поле резонатора изменения его добротности и резонансной частоты представляют соотношениями

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta W_{зан}}{W_{зан}} \approx (\varepsilon - 1)\eta, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} \right) Q_0 = \varepsilon \cdot tg\delta \cdot Q_0 \eta, \quad (2)$$

где ε и $tg\delta$ – диэлектрические параметры объекта исследования, по значению и изменению которых он диагностируется; $W_{зан}$ и $\Delta W_{зан}$ – запасаемая в резонаторе энергия и её изменение при внесении пробы в поле резонатора; η – параметр, который в данном рассмотрении одновременно характеризует и степень включения объекта в поле, и его геометрические размеры, плотность и форму; Q_0 и Q – ненагруженная добротность РИП в отсутствие и при наличии образца.

Если отдельно выделять сигналы, определяющие величины $\Delta f/f_0$, $\Delta Q/Q$ и по ним оценивать ε и $tg\delta$, то значение η необходимо устанавливать, используя дополнительные сведения об объекте и структуре поля СВЧ-РИП. Погрешность определения η и невоспроизводимость этого параметра являются основными источниками значительных погрешностей указанного подхода.

Очень часто ε представляется малоинформативным параметром СВЧ-диагностики и его можно исключить из рассмотрения. Это характерно, например, для диагностики полупроводников, у которых $tg\delta$ однозначно связан с удельным сопротивлением материала. При контроле влажности материалов на СВЧ оказывается также целесообразным измерять именно эффективное значение $tg\delta$. Тогда, как следует из (1) и (2), сигнал измерительной информации формируется в виде отношения $\frac{\Delta Q}{Q} \left(\frac{\Delta f}{f} \right)^{-1}$ и можно исключить необходимость дополнительной оценки η , а, следовательно, и обеспечить воспроизводимость этого параметра

полнительной оценки η , а, следовательно, и обеспечить воспроизводимость этого параметра

$$N = \frac{\Delta Q}{Q} \cdot \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)^{-1} \approx K tg\delta \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}. \quad (3)$$

Следовательно, в общем случае необходимо производить одновременное измерение изменений добротности и резонансной частоты.

Если РИП обеспечивает соблюдение условия (3), то можно реализовать следующие два варианта модуляционной методики, базирующейся на вариации степени включения образца в СВЧ-поле резонатора. Первый основан на введении фиксированной расстройки $(\Delta f/f_0)_{задан}$ РИП и изменении включения образца до настройки в резонанс с регистрацией $\Delta Q/Q$ или соответствующего изменения коэффициента передачи [6].

Недостатком этого варианта является существенный вклад в погрешность измерения $tg\delta$ таких мешающих факторов, как невоспроизводимость параметров СВЧ-детектора и нестабильность мощности СВЧ-генератора. Впрочем, влияние таких факторов может быть уменьшено при некоторых схемных построениях измерителя (применение системы автоматического регулирования мощности, создание опорного канала в СВЧ-тракте, использование управляемых СВЧ-аттенуаторов для отсчета амплитудных изменений). Однако это приводит к усложнению схемы измерителя.

В другом варианте этой методики можно предложить введение фиксированного значения изменения коэффициента передачи РИП и изменением степени включения образца достигать установки его по нуль-индикатору. Возникающее при этом изменение резонансной частоты $\Delta f/f_0$ РИП измеряется в отсутствии влияния указанных выше мешающих факторов и не связано с проявлением других. Функциональная схема устройства, реализующая этот подход, представлена на рис. 1. Особенностью ее является двухканальность с наличием эталонного резонатора, идентичного РИП. При этом существенно снижаются погрешности, связанные с нестабильностью частоты и мощности СВЧ-генератора, влиянием температуры окружающей среды. Измерение расстройки РИП (основного выделяемого информативного сигнала) здесь производится частотно-временным методом, описанным, например, в [1].

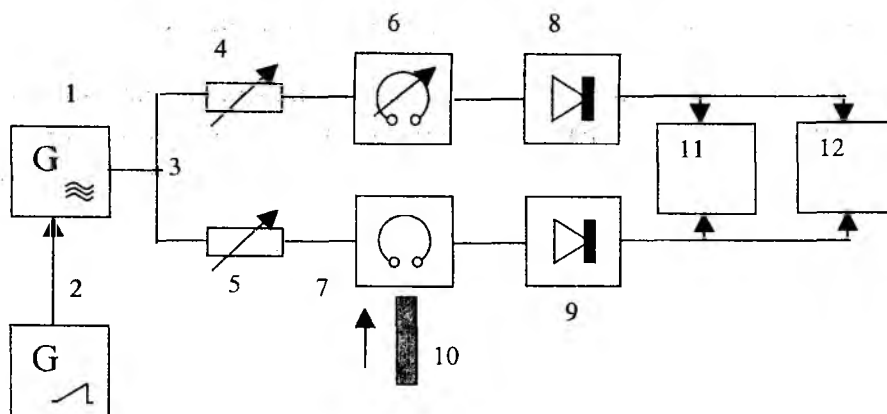


Рис. 1

Частота СВЧ-генератора 1 периодически изменяется пилообразным напряжением генератора 2. Через делитель мощности 3 СВЧ-сигнал направляется в два симметричных канала, в которых содержатся управляемые аттенюаторы 4 и 5, эталонный 6 и измерительный 7 резонаторы, СВЧ-детекторы 8 и 9. Сигналы с детекторов поступают на измеритель расстройки 11 и нуль-индикатор 12. Вначале путем перестройки резонатора 6 добиваются равенства резонансных частот резонаторов 6 и 7. Регулируя ослабление аттенюаторов 4 и 5, устанавливают некоторую разность между сигналами с детекторов (сигнал в опорном канале больше сигнала в измерительном канале). Перемещая образец материала 10 в поле резонатора 7, добиваются условия равенства сигналов с детекторов (установка нуля по нуль-индикатору 12). Измеряют при этом частотную расстройку между резонаторами измерителем 11.

Однако в обоих вариантах устройство усложнено техникой регистрации изменения резонансной частоты, которая в первом случае фиксирована, а во втором измеряется. На базе вариации степени включения образца в поле РИП можно предложить еще один вариант, не требующий непосредственной оценки $\Delta f/f_0$.

Этот вариант основан на использовании ЧМ СВЧ-питании РИП. Последний в этом случае, играя роль дискриминатора, формирует на выходе СВЧ-детектора переменную составляющую, в которой присутствует сигнал с частотой модуляции Ω . Величина этого сигнала в общем случае зависит от девиации частоты δf СВЧ-сигнала, добротности и расстройки РИП относительно резонанса. Для количественной оценки этого сигнала воспользуемся известным выражением коэффициента передачи резонатора, учитывая, что в общем случае он зависит от добротности и расстройки относительно генератора [7]:

$$T(f, f_0, Q) = \frac{T_0}{1 + \frac{4Q^2}{f_0^2} (f - f_0)^2}, \quad (4)$$

где $T_0 = \frac{4PQ^2}{Q_{v1}Q_{v2}}$ – мощность на выходе резонатора на резонансной частоте; P – мощность генератора; Q_{v1}, Q_{v2} – внешняя добротность для двух элементов связи.

Если частота СВЧ-сигнала изменяется по гармоническому закону $f(\varphi) = f + \delta f \cos \varphi$, где f – средняя частота генератора; δf – девиация частоты; $\varphi = \Omega t$ – фаза модулирующих колебаний; Ω – циклическая частота модуляции, то форма огибающей на выходе детектора, включенного после резонатора, имеет вид

$$U(f + \delta f \cos \varphi) = k[T(f + \delta f \cos \varphi)]^{n/2}, \quad (5)$$

где k – коэффициент преобразования детектора; n – степень нелинейности детекторной характеристики.

В общем случае для определения амплитуд гармонических составляющих этого сигнала требуется произвести прямое преобразование Фурье. В силу четности $T(f + \delta f \cos \varphi)$ по φ коэффициенты при синусах обращаются в нуль. Для амплитуды первой гармоники имеем

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U(f + \delta f \cos \varphi) \cos \varphi d\varphi. \quad (6)$$

В том случае, если δf – малая величина, то можно записать

$$U(f + \delta f \cos \varphi) \cong U(f) + \frac{\partial U}{\partial f} \delta f \cos \varphi. \quad (7)$$

Первый член правой части уравнения есть постоянная составляющая на фиксированной частоте, а второй – переменная. Амплитуда переменной составляющей с частотой Ω

$$U_{\Omega} = \frac{\partial U}{\partial f} \delta f = k \frac{n}{2} T^{n-1} \frac{\partial T}{\partial f} \delta f. \quad (8)$$

Численные расчеты по формулам (6) и (8) показали, что при $n = 2$, $(f - f_0)/f_0 = \frac{1}{2Q\sqrt{3}}$ и значении $\frac{\delta f}{f - f_0} = 0,1$ отличие значений U_{Ω} и a_1 составляет 0,6%, а при значении

$\frac{\delta f}{f - f_0} = 0,05$ – менее 0,1%. Следовательно, можно принять $U_{\Omega} \cong a_1$ при $\frac{\delta f}{f - f_0} \leq 0,05$.

В графике зависимости этого сигнала от расстройки $(f - f_0)/f_0$ РИП наиболее характерными являются точки перегиба резонансной кривой, в которых сигнал принимает максимальные значения, и которые можно найти из условия $\frac{\partial^2 T}{\partial f^2} = 0$. Этим точкам соответствуют относительные расстройки

$$\frac{f - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f_n}{f_0} = \pm \frac{1}{2Q\sqrt{3}}. \quad (9)$$

Если производить расстройку путем изменения частоты генератора или перестройкой резонатора, например, путем изменения объема, не приводящей к изменению добротности, то значения сигналов в обеих точках перегиба будут равны. Если при фиксированной частоте генератора производить расстройку введением в поле резонатора образца материала с потерями, то значения сигналов в указанных ранее точках будут различны. Поскольку изменение резонансной частоты в этом случае происходит в одном направлении, а именно в направлении уменьшения, частота генератора должна удовлетворять условию:

$$f_v < f_0 - \frac{f_0}{2Q\sqrt{3}}. \quad (10)$$

Пусть Q_1 и Q_2 – добротность резонатора при совпадении точек перегиба на левом и правом склоне с частотой генератора, f_1 и f_2 – соответствующие резонансные частоты. Тогда отношение соответствующих сигналов U_1 и U_2 , произведя соответствующие подстановки и преобразования в (4), (8) и (9), можно представить в виде:

$$\frac{U_2}{U_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n-1}{2}} \left| \frac{D_2}{D_1} \right| \cong \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{n+1}, \quad (11)$$

где $T_{1,2} = T(f_v, f_{1,2}, Q_{1,2})$; $D_{1,2} = \left. \frac{\partial T(f, f_{1,2}, Q_{1,2})}{\partial f} \right|_{f=f_v}$.

Нетрудно заметить, что

$$\frac{f_1 - f_2}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \cong \frac{1}{2\sqrt{3}} \left(\frac{1}{Q_2} + \frac{1}{Q_1} \right). \quad (12)$$

Тогда левая часть выражения (3) примет вид:

$$N = 2\sqrt{3} \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 + Q_2} = 2\sqrt{3} \frac{1 - \frac{Q_2}{Q_1}}{1 + \frac{Q_2}{Q_1}}, \quad (13)$$

а правая либо останется неизменной при условии инвариантности N по отношению к η либо должна устанавливаться из отдельных вычислений.

Из (11) и (13) в общем случае

$$N = (Q_2^{-1} - Q_1^{-1}) \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)^{-1} = 2\sqrt{3} \frac{1 - \sqrt[n+1]{\frac{U_2}{U_1}}}{1 + \sqrt[n+1]{\frac{U_2}{U_1}}} = F(\varepsilon, \text{tg} \delta, \eta). \quad (14)$$

В частном случае $N = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \text{tg} \delta$

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \text{tg} \delta = 2\sqrt{3} \frac{1 - \sqrt[n+1]{\frac{U_2}{U_1}}}{1 + \sqrt[n+1]{\frac{U_2}{U_1}}}. \quad (15)$$

Процедура измерения по этому варианту реализуется технически несложно по схеме рис. 2.

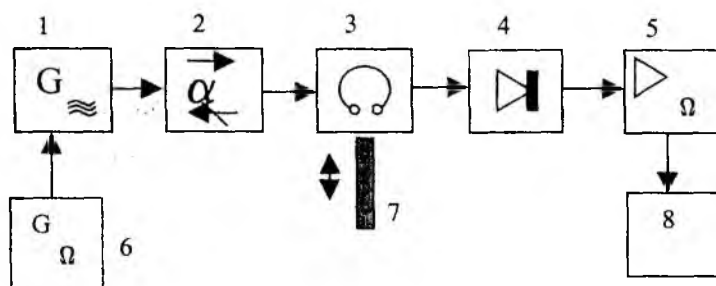


Рис. 2

СВЧ-колебания генератора 1 частотой $f_v < f_0 - f_0 / (2Q\sqrt{3})$ и генерируемой мощностью P модулируются по частоте напряжением низкочастотного генератора 6 с частотой Ω так, что девиация $\delta f \ll f_0 / Q_0$. Эти колебания через развязывающее устройство 2 подаются на резонатор 3. Низкочастотный сигнал с СВЧ-детектора 4 подается на вход селективного

усилителя 5, настроенного на частоту Ω , выходной сигнал усилителя подается на контроллер 8. Образец 7 с помощью специального автоматического устройства перемещается в поле РИП.

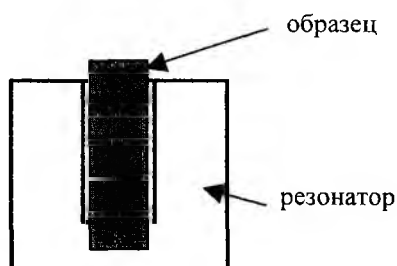


Рис. 3

В экспериментальных исследованиях в качестве РИП использовался коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью (рис.3), центральный проводник которого представляет собой отрезок круглого волновода, являющегося запредельным для рабочей частоты и служащего для ввода цилиндрического образца исследуемого материала. Резонансная частота резонатора в эксперименте составляла 9560 МГц, добротность – 3200, частота модуляции – 1 кГц, девиация СВЧ-сигнала варьировалась в диапазоне от 150 до 500 кГц и определялась с помощью анализатора спектра С4-27. Начальная расстройка $f_v - f_0$ составляла (1,3...2)

$$f_0 / (2Q_0 \sqrt{3}).$$

Сигнал с селективного усилителя подавался через плату АЦП на ПК. Программа обработки этого сигнала, созданная на базе пакета Matlab 6.1, выделяла его огибающую за время перемещения образца, производила ее графическое построение и определяла значения U_1, U_2 . На рис. 4 приведены типичные экспериментальные графики зависимости амплитуды сигнала от времени перемещения образцов различных материалов.

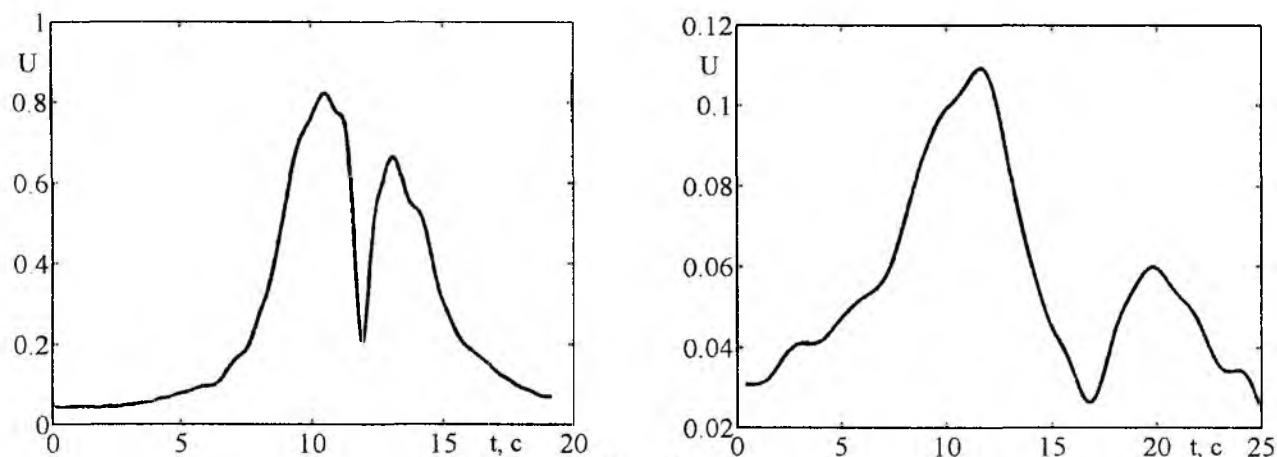


Рис. 4

Заметим, что в этом варианте градуировка измерительного устройства и погрешность измерения не зависят от исходной добротности Q_0 РИП, мощности генератора, частоты модуляции и параметров СВЧ-детектора. Однако условие заданности характеристики преобразования СВЧ-детектора является необходимым. Кроме того, реализация этого способа доступна при условии, что изменение возмущения резонатора образцом возможно и в таких пределах, что изменение его резонансной частоты превышает ширину резонансной кривой по уровню половинной мощности.

Так как в рассмотренном варианте фактически модулируется степень включения объекта в электромагнитное поле СВЧ-РИП, то этот подход можно отнести к модуляционному методу. Важным моментом является исключение необходимости измерять изменение добротности РИП, что во всех СВЧ-резонансных методах определяет их сложность. Кроме того, при этом нет потребности знать характеристики преобразования СВЧ-детектора.

Заметим отдельно, что соблюдение условий малого возмущения не является обязательным для реализации описанного подхода. Отношение этих сигналов можно определять численно или аналитически по более строгой теории [8], а тип РИП и режим его работы выбирать с учетом диапазона действия условий инвариантности такого отношения к влияниям указанных факторов. Примером такого проектирования ИП являются сенсоры, описанные в [9].

Однако, часто изменение уровня возмущения электромагнитного поля резонатора образцом как часть измерительной процедуры оказывается практически неудобным или технически сложным. Альтернативным вариантом модуляционного подхода в формировании выходного сигнала измерительной информации $\Delta Q/Q$ может являться следующий.

Как и в предыдущем для исключения влияния невоспроизводимости параметров СВЧ-детектора, мощности генератора и т.п., применяют малую ЧМ модуляцию СВЧ-питания. При этом для определения $\Delta Q/Q$ можно воспользоваться переменным сигналом в двух характерных точках резонансной кривой – в резонансе и в точке перегиба. Прохождение этих точек будем осуществлять медленной периодической перестройкой частоты СВЧ-генератора пилообразным управляющим напряжением. В резонансе на выходе СВЧ-детектора при $n = 1$ будет иметь место максимум сигнала на удвоенной частоте модуляции 2Ω

$$U_2 = \frac{1}{2} U_0 \frac{4Q^2}{f_0^2} (\delta f)^2, \quad (16)$$

где $U_0 = \sqrt{kT_0}$.

В точке перегиба будет выделяться сигнал на частоте модуляции Ω

$$U_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} U_0 \frac{Q}{f_0} \delta f. \quad (17)$$

В принципе, добротность Q может определяться из отношения

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{Q}{f_0} \delta f. \quad (18)$$

Однако необходимость знать максимальную девиацию δf может составить существенные неудобства при измерениях или являться источником погрешности, если считать её заданной и постоянной величиной.

В СВЧ-диагностике материалов расчетные соотношения для определения $tg\delta$ или электропроводности и величин параметров, связанных с ними, содержат относительное изменение добротности $\frac{Q_0 - Q_1}{Q_1}$, в котором Q_0 – исходная добротность резонатора без образца.

Эту величину можно выразить через отношение U_2/U_1 соответственно для исходного резонатора U_{20}/U_{10} и резонатора с включенным в его СВЧ-поле исследуемым образцом U_{2x}/U_{1x} . При этом из (18) получаем

$$\frac{Q_0 - Q_1}{Q_1} = \frac{U_{20}}{U_{10}} \left(\frac{U_{2x}}{U_{1x}} \right)^{-1} - 1. \quad (19)$$

В итоге процедура определения $tg\delta$ при измерении $(Q_0 - Q_1)/Q_1$ сводится к измерению U_{2x}/U_{1x} при заданном U_{20}/U_{10} или с дополнительным измерением и этой величины. В любом случае будет снижено влияние невоспроизводимости характеристики СВЧ-генератора, СВЧ-детектора, устройств связи резонатора с внешним трактом и т.п. на результаты измерений U_{20}/U_{10} . Простейшая схема измерительной установки для реализации этого варианта представлена на рис. 5.

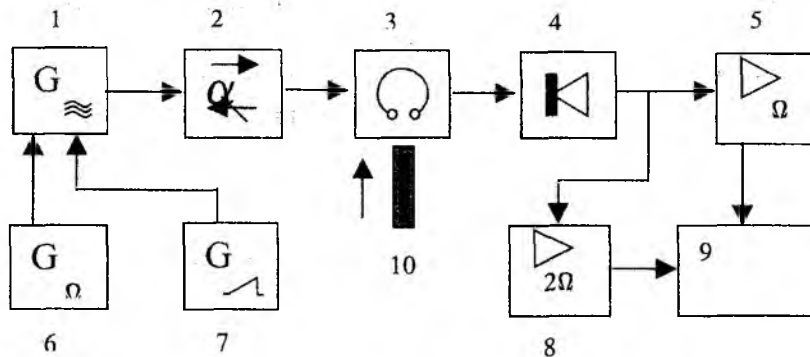


Рис. 5

Сигнал СВЧ-генератора 1 модулируется по частоте напряжением низкочастотного генератора 6 с частотой Ω . Кроме того, частота генератора 1 периодически перестраивается пилообразным напряжением генератора 7 с частотой значительно меньшей, чем Ω . Модулированный СВЧ-сигнал через развязывающее устройство 2 подается на резонатор 3. Выходной сигнал СВЧ-детектора 4, установленного на выходе резонатора, подается на селективные усилители 5 и 8, настроенные на частоты Ω и 2Ω . Сигналы с выходов усилителей поступают на контроллер 9. Полоса перестройки частоты СВЧ-сигнала устанавливается такой, что позволяет получить АЧХ резонатора как пустого, так и с образцом 10.

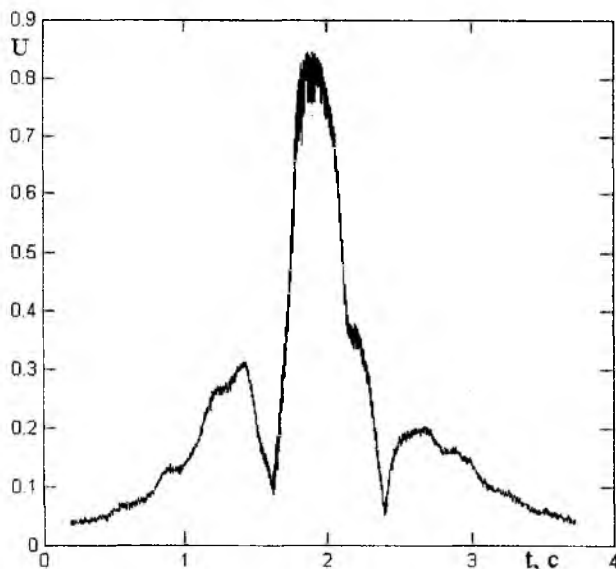


Рис. 6

Проведен эксперимент с резонатором, описанным ранее. Сигналы с усилителей 5 и 8 подавались на ПК. На рис. 6 приведен график зависимости амплитуды сигнала с частотой 2Ω от времени перестройки частоты генератора при девиации его частоты, сравнимой с полосой резонатора.

Список литературы: 1. Головки Д.Б., Скрипник Ю.О., Яненко О.П. Модуляційні НВЧ-вимірювачі електричних та неелектричних величин. Київ: МП «Леся», 2001. 232 с. 2. Ахманаев В.Б., Детинко В.М., Медведев Н.В. и др. Неразрушающие бесконтактные СВЧ резонаторные методы локального контроля электрофизических параметров полупроводниковых материалов: Обзор // Дефектоскопия. 1986. №1. С. 23 – 35. 3. Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Рябухин А.А. Фотомодуляционная СВЧ диагностика полупроводниковых структур // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1999. Вып. 111. С. 7 – 13. 4. Москалев И.Н. Измерение малых сдвигов резонансной частоты и малых изменений добротности резонаторов СВЧ диапазона // ЖТФ. 1971. Т. 41, № 8. С. 1651 – 1660. 5. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1968. 364 с. 6. Гордиенко Ю.Е., Кочержин А.И. Улучшение метрологических характеристик СВЧ резонаторных измерителей влажности сыпучих материалов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 120. С. 131 – 134. 7. Хайкин М.С. Метод частотной модуляции для исследования поверхностного сопротивления металлов // ПТЭ. 1961. № 3. 8. Гордиенко Ю.Е., Рябухин А.А. Вычисление комплексных резонансных частот СВЧ резонаторных датчиков апертурного типа // Радиозлектроника и информатика. 2001. № 2. С. 4 – 7. 9. Гордиенко Ю.Е., Панченко А.Ю., Рябухин А.А. Проблемы инвариантности измерительной информации в СВЧ диагностике материалов и объектов // Сб. науч. тр. по материалам 6-й междунар. конфер. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации». Харьков: ХТУРЭ, 2000. С. 457 – 459.