



ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ АПЧ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СВЧ ГЕНЕРАТОРА В МИКРОВОЛНОВОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ

БОНДАРЕНКО И.Н., ГОРДИЕНКО Ю.Е.,
ЛАРКИН С.Ю.

Рассматриваются возможности системы АПЧ измерительного СВЧ генератора при формировании информационных сигналов в микроволновой сканирующей микроскопии. Описываются расчетные соотношения, приводятся оценки значений информационных сигналов.

1. Введение

Метод ближнеполевой микроволновой сканирующей микроскопии (МСМ) предоставляет возможность исследования электрофизических характеристик поверхностей различных материалов, в том числе диэлектриков и полупроводников. Одной из возможных реализаций метода является использование резонансной системы, в частности объёмного резонатора с микрозондом, расположенным вблизи исследуемой поверхности и перемещаемым вдоль неё. Пространственная разрешающая способность метода будет при этом определяться размерами зонда и его расстоянием от поверхности, а чувствительность – величиной коэффициента преобразования изменений электрофизических характеристик исследуемого материала в изменения характеристик резонатора и точностью измерения этих изменений [1, 2].

Для обеспечения МСМ нет необходимости в постоянном измерении значений резонансной частоты и добротности при фиксации каждого исследуемого локального микроучастка поверхности. Для этого достаточно обеспечить измерение величин (или функций),

изменения которых соответствовало бы изменению соответствующих значений электрофизических характеристик поверхности при перемещении вдоль неё. Более того, такое решение позволяет осуществить автоматизацию проводимых измерений.

Таковыми величинами могут быть изменения резонансной частоты и добротности от первоначальных значений или другие параметры, меняющиеся в известной зависимости от измеряемых.

Во многих работах по МСМ в качестве системы формирования информационных сигналов используется система АПЧ измерительного СВЧ генератора по резонансному измерительному преобразователю (РИП) с частотной модуляцией СВЧ генератора [3-5].

Однако в этих работах практически отсутствует теоретическая оценка ее предельных возможностей и расчетные соотношения для градуировочных характеристик.

Целью работы является анализ различных реализаций данной системы формирования сигналов измерительной информации и оценка ее метрологических возможностей.

2. Функциональные схемы измерительной системы

Система формирования информационных сигналов с использованием АПЧ измерительного генератора по РИП с ЧМ СВЧ генератора может быть реализована в двух вариантах, отличающихся способом включения РИП (на проходе или на отражение). Функциональные схемы систем приведены на рис. 1 и 2.

В качестве задающего СВЧ генератора в МСМ обычно используется твердотельный генератор с возможностью электрической перестройки и модуляцией частоты, который охвачен системой ее автоматической настройки на резонансную частоту РИП модуляционного типа (на схеме выделена пунктирной линией) [5, 6]. Работает рассматриваемая система АПЧ следующим образом. С генератора модулирующей частоты 8 напряжение подается на элемент, управляющий частотой стабилизируемого генератора СВЧ 1 для осуществления неглубокой частотной модуляции. Частотно-модулированный сигнал через развязывающее

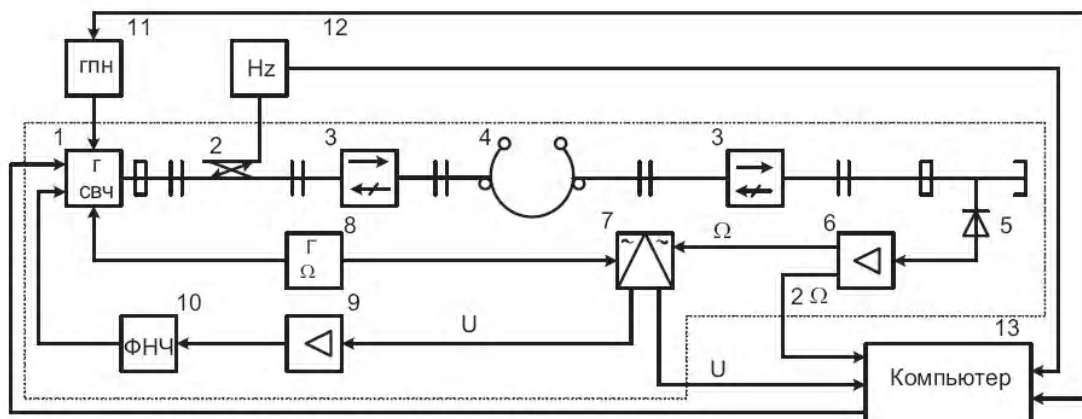


Рис. 1. Функциональная схема СВЧ системы на основе генератора с АПЧ по РИП с проходным включением резонатора

устройство – ферритовый вентиль 3 поступает в резонатор 4, на выходе которого через ферритовый вентиль включен детектор 5. После детектора сигнал усиливается в усилителе модулирующей частоты 6 и поступает на фазовый детектор 7, куда в качестве опорного напряжения подается напряжение с генератора модулирующей частоты.

При средней частоте генератора, равной резонансной частоте резонатора, напряжение ошибки на выходе детектора отсутствует. Чем больше разность частот генератора и резонатора (около f_0), тем больше амплитуда напряжения модулирующей частоты. При увеличении Δf переменное напряжение достигает максимума, а затем уменьшается. Фаза напряжения промежуточной частоты зависит от знака Δf .

После сравнения сигналов с выхода усилителя частоты модуляции и от опорного генератора модулирующей частоты в фазовом детекторе на его выходе будет присутствовать сигнал ошибки на постоянном токе, величина которого также будет определяться величиной отклонения частоты генератора от частоты резонатора, а полярность – знаком отклонения. После усиления в УПТ 9, фильтрации в ФНЧ 10 сигнал поступает на элемент, управляющий частотой стабилизируемого СВЧ генератора, и перестраивает его до тех пор, пока частота генератора не станет равной частоте резонатора. Ответвитель 2 предназначен для ответвления части мощности генератора для измерения начального значения частоты с помощью частотомера 12. Генератор пилообразного напряжения 11 используется для предварительной настройки схемы.

3. Основные соотношения

Сигнал сканирования, связанный с $\delta f / f_0$, выделяется в виде сигнала ошибки после фазового детектора 7.

Величина его в общем случае определяется выражением

$$\frac{\delta f}{f_0} \cong \frac{\delta f_r}{f_0} \cong \frac{\delta U(\delta f_0) \cdot S}{f_0}, \quad (1)$$

где $\delta U(\delta f_0)$ – напряжение сигнала ошибки, используемое для подстройки частоты измерительного генератора; S – крутизна перестройки частоты измерительного генератора.

В работе предлагается нормировать ее по величине $\Delta f / f$, измеряемой один раз в установочном эксперименте. В итоге

$$\frac{\delta U(\delta f)}{\Delta U(\Delta f)} = \frac{\delta f / f_0}{\Delta f / f_0}. \quad (2)$$

Сигнал сканирования, связанный с $\delta Q / Q$, выделяется в виде напряжения на СВЧ детекторе на частоте 2Ω , усиливается узкополосным усилителем и далее поступает на систему обработки.

Выражения для численного определения величины этого сигнала в литературе отсутствуют. Поэтому определим его также с ориентацией на целесообразность нормирования по типу (2).

Напряжение сигнала на детекторе может быть представлено соотношением

$$U_d = P_r \cdot K_c \cdot K_p^{n/2} \cdot S_d \cdot R_d, \quad (3)$$

где P_r – мощность измерительного СВЧ генератора; K_c – коэффициент передачи согласующих и ответвляющих устройств; K_p – коэффициент передачи резонансного измерительного преобразователя (РИП); S_d – коэффициент преобразования (чувствительность) детектора; R_d – сопротивление детекторного диода в рабочей точке; n – степень нелинейности характеристики детектора.

Коэффициент передачи РИП с учетом коэффициентов связи [7]:

$$K_p = \frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \frac{1}{1+a^2}, \quad (4)$$

где β_1, β_2 – коэффициенты связи

$$\left(\beta_i = \frac{Q_0}{Q_{\text{внi}}} = \frac{\overline{P_{\text{внi}}}}{P_p} \right); Q_0$$

– собственная добротность резонатора; $Q_{\text{внi}}$ – внешняя добротность; $\overline{P_{\text{внi}}}$ – средняя мощность потерь в соответствующем элементе связи или мощность, излучаемая из резонатора через соответствующий элемент связи при выключенном источнике сигнала; $\overline{P_p}$ – средняя мощность потерь собственно в резонаторе; $a = Q_n(\omega_r/\omega_0 - \omega_0/\omega_r) \approx 2\Delta\omega Q_n/\omega_0$ – обобщенная расстройка; $\omega_{\tilde{a}}$ – частота измерительного генератора; $\Delta\omega$ – отклонение частоты измерительного генератора от резонансной частоты ω_0 .

Для мощности ЧМ сигнала можно записать [8]

$$P_r^{\text{ЧМ}} \cong P_r \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k^2(m) \cos^2(\omega_r + k\Omega)t, \quad (5)$$

где $J_k(m)$ – функция Бесселя первого рода от аргумента m ; $m = \Delta\omega_d/\Omega$ – индекс частотной модуляции; $\Delta\omega_d$ – девиация частоты измерительного генератора; Ω – частота модуляции.

При $m < 1$

$$P_r^{\text{ЧМ}} \approx P_r \cdot J_0^2(m). \quad (6)$$

Выражение (3) с учетом (4) и (6) при $\omega_{\tilde{a}} = \omega_0$, $\Delta\omega = \Delta\omega_d \cos \Omega t$ и квадратичности характеристики детектора ($n = 2$) преобразуется к следующему виду:

$$U_d \approx \frac{4\beta_1\beta_2 J_0^2(m) P_r K_c S_d R_d}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{2Q_n \Delta\omega_d \cos \Omega t}{\omega_0} \right)^2}. \quad (7)$$

При $\Delta\omega_d \ll \omega_0$

$$U_d \approx A_0 \left[1 - 2 \left(\frac{Q_n \Delta\omega_d}{\omega_0} \right)^2 - 2 \left(\frac{Q_n \Delta\omega_d}{\omega_0} \right)^2 \cos 2\Omega t \right]. \quad (8)$$

Первое и второе слагаемые в квадратной скобке соотношения (8) будут определять величину постоянного смещения на СВЧ детекторе. Третье слагаемое определяет амплитуду информационного сигнала на частоте 2Ω , который может быть выделен и усилен с помощью селективного усилителя и использован для определения величин δQ_i :

$$U_d^{2\Omega} \approx A_0 \cdot 2 \frac{Q_H^2 (\Delta\omega_d)^2}{\omega_0^2}. \quad (9)$$

При изменении добротности РИП

$$\begin{aligned} \delta Q_H &= Q_{H1} - Q_{H2}; \\ \delta U_d^{2\Omega} &\approx A_0 \cdot 2 \frac{(\Delta\omega_d)^2}{\omega_0^2} (Q_{H1}^2 - Q_{H2}^2) \end{aligned} \quad (10)$$

и, соответственно,

$$\frac{\delta U_d^{2\Omega}}{U_d^{2\Omega}} \approx \frac{(Q_{H1}^2 - Q_{H2}^2)}{Q_{H1}^2}. \quad (11)$$

При $Q_{i1} \sim Q_{i2}$ или $\delta Q_i \ll Q_{i1}, Q_{i2}$

$$\frac{\delta U_d^{2\Omega}}{U_d^{2\Omega}} \approx \frac{2\delta Q_H}{Q_{H1}} \quad \text{или} \quad \frac{\delta Q_H}{Q_{H1}} \approx \frac{\delta U_d^{2\Omega}}{2U_d^{2\Omega}}. \quad (12)$$

Величину относительного изменения добротности так же, как для $\delta f / f_0$ (2), можно нормировать по калиброванному изменению добротности для эталонного объекта исследования.

Система АПЧ с отражательным включением РИП (см.рис.2) будет функционировать аналогично системе с проходным включением, поскольку и в этом случае сигнал на частоте модуляции Ω также будет менять фазу и амплитуду в зависимости от направления и величины изменения частоты. Отражательное включение РИП можно обеспечить с помощью ферритового циркулятора или ответвителя 2 (см.рис.2).

Величина δf при этом определяется также с использованием соотношений (1) и (2).

Для отражательного включения РИП с учетом того, что коэффициент отражения описывается формулой:

$$R_P = 1 - \frac{4\beta_1(1+\beta_2)}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \frac{1}{1+a^2}, \quad (13)$$

соответственно:

$$R_P = 1 - \frac{4\beta}{(1+\beta)^2} \frac{1}{1+a^2} \quad (14)$$

или при связи, равной критической ($\beta = 1$):

$$R_P = \frac{a^2}{1+a^2}, \quad (15)$$

можно записать:

$$U_d = P_r \cdot K_c \cdot S_d \cdot R_d \cdot K_P^{n/2} + P_r \cdot K_{разв} \cdot S_d \cdot R_d, \quad (16)$$

где $K_{разв}$ – коэффициент развязки направленного ответвителя (или циркулятора).

С учетом выражений (5) и (6) и допущений, принятых ранее, для отражательного включения РИП (см.рис.2) можно получить соотношение, подобное (8):

$$U_d = A_1 \left\{ 1 - \frac{4\beta}{(1+\beta)^2} \left[\begin{aligned} &1 - 2 \left(\frac{Q_H \Delta\omega_d}{\omega_0} \right)^2 - \\ &- 2 \left(\frac{Q_H \Delta\omega_d}{\omega_0} \right)^2 \cos 2\Omega t \end{aligned} \right] \right\} + A_1 K_{разв}, \quad (17)$$

где $A_1 = J_0^2(m) \cdot P_r \cdot K_c \cdot S_d \cdot R_d$.

При $\beta = 1$ с учетом (15)

$$U_d \approx A_1 \left[2 \left(\frac{Q_H \Delta\omega_d}{\omega_0} \right)^2 + 2 \left(\frac{Q_H \Delta\omega_d}{\omega_0} \right)^2 \cos 2\Omega t \right] + A_1 K_{разв}. \quad (18)$$

Сигнал на частоте 2Ω в данном случае также может быть выделен и усилен с помощью селективного

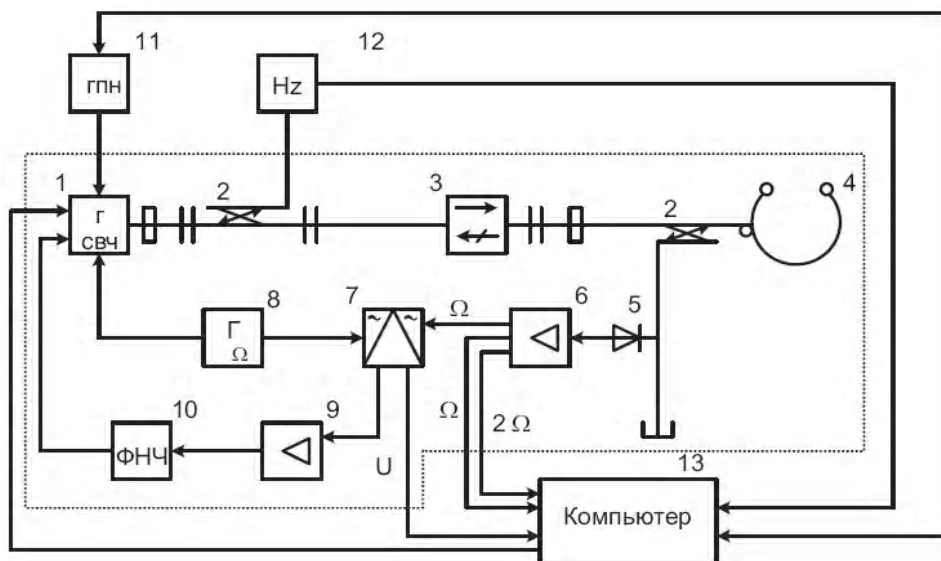


Рис. 2. Функциональная схема СВЧ системы на основе генератора с АПЧ по РИП с отражательным включением резонатора

усилителя и использован для определения величин δQ_i в соответствии с соотношениями (9)-(12).

Особенностью рассматриваемых схем формирования сигналов является то, что автоподстройка частоты измерительного СВЧ генератора и работа в режиме совмещения его частоты с резонансной частотой РИП позволяют снизить влияние на информационный сигнал шумов, обусловленных частотными флуктуациями генератора, использование информационного сигнала на частоте 2Ω позволяет уменьшить составляющую шума детектора, пропорциональную $1/f$, а селективное усиление – полосу усиливаемых шумов.

4. Количественные оценки

Оценим величины сигналов на детекторе, соответствующие измеряемым значениям δf и δQ для рассмотренных схем.

При $\beta = \beta_1 = \beta_2 = 0,5$; P_{r1} мВт; $K_c \approx 0,9$; $J_0^2(m) \approx 0,96$ (при $m = 0,3$); $S_d \sim 1$ мА/мВт; $R_d \sim 10^3$ Ом для амплитудного коэффициента A_0 (7), (8) получим соответственно $\sim 0,215$ В.

Сигнал ошибки на постоянном токе, связанный с величиной δf , будет пропорционален $(2Q_n \Delta\omega_d / \omega_0)^2$. Оценивая эту величину при $Q_i \sim 10^3$, $\omega_0 \approx 2\pi \cdot 10^{10}$, $\Delta\omega_d \approx 2\pi \cdot 5 \cdot 10^3$, получим $\delta U_f \sim 2 \cdot 10^{-7}$ В.

Такого же порядка величину можно получить для U_Q (9), а для δU_0 соответственно $U_0 (\Delta Q / Q)$ В (12) на частоте 2Ω .

Для схемы с отражательным включением значения напряжений информационных сигналов при тех же допущениях и $\beta = 1$ составляют величины порядка $0,75 \cdot 10^{-6}$ В.

Использование направленного ответвителя в схеме с отражательным включением РИП представляется более предпочтительным, поскольку такое решение обеспечивает более качественную развязку по сравнению с ферритовым циркулятором (см. (17) и (18)).

В то же время, если в схеме с проходным включением РИП (см. рис. 1) выбор рабочей точки СВЧ детектора можно осуществить регулировкой выходной мощности измерительного генератора, то в схеме с отражательным включением РИП (см. рис. 2) либо необходим дополнительный стабилизированный источник постоянного смещения, либо надо варьировать величину коэффициента связи с РИП (17), что будет вести к снижению чувствительности измерений и к ухудшению характеристик системы АПЧ из-за снижения дискриминационных характеристик резонатора.

Экспериментальная оценка возможностей системы АПЧ измерительного генератора производилась на макете микроволнового микроскопа в трехсантиметровом диапазоне длин волн при проходном включении РИП. Значение модулирующей частоты Ω составляло 13,5 кГц, амплитуды сигналов Ω и 2Ω на выходе детектора изменялись в пределах от 10^{-8} В до

10^{-6} В в зависимости от изменений частоты и добротности РИП. Система АПЧ устойчиво работала при изменениях резонансной частоты РИП до 10 МГц.

5. Выводы

Проведенный анализ показывает, что использование системы АПЧ с частотной модуляцией измерительного СВЧ генератора помимо повышения стабильности частоты обеспечивает формирование информационных сигналов микроволнового сканирующего микроскопа с помощью функциональных сигналов системы АПЧ.

Получены расчетные соотношения для величин информационных сигналов в зависимости от параметров измерительной схемы и системы АПЧ, которые подтверждаются экспериментальными результатами. Амплитуда информационных сигналов на частотах модуляции может быть повышена за счет увеличения добротности РИП, а также на два-три порядка за счет увеличения девиации частоты при одновременном пропорциональном увеличении частоты модуляции.

Литература: 1. *Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan V.K.* Microwave Electronics. Measurements and Materials Characterization. John Wiley & Sons, Ltd., 2004. 537p. 2. *Rosner B., Van der Weide D.W.* High-frequency near-field microscopy // Review of Scientific Instruments, 2002. Vol. 73, N7. P. 2505-2525. 3. *Steinhauer D.E., Vlahacos C.P., Dutta S.K., Feenstra B.J., Wellstood F.S., Anlage S.M.* Quantitative imaging of sheet resistance with a scanning near-field microwave microscope // Appl. Phys. Lett., 1998. Vol. 72, N7. P. 861-863. 4. *Anlage S.M., Steinhauer D.E., Vlahacos C.P., Feenstra B.J., Thanawalla A.S., Wensheng Hu, Dutta S.K., Wellstood F.S.* Superconducting material diagnostics using a scanning near-field microwave microscope // IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, 1999. Vol. 9, N2. P. 4127-4132. 5. *Imtiaz Atif, Anlage S.M.* Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of near-field microwave microscope // Journ. of Appl. Phys., 2006, 100, 044304. 6. *Бычков С.И., Буренин Н.И., Сафаров Р.Т.* Стабилизация частоты генераторов СВЧ. М.: Сов. радио, 1962. 376с. 7. *Каганов В.И.* Системы автоматического регулирования в радиопередатчиках. М.: Связь, 1969. 232с. 8. *Альтман Дж.* Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968. 487с. 9. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. шк., 1988. 448с.

Поступила в редколлегию 29.08.2009

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Черпак Н.Т.

Бондаренко Игорь Николаевич, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: криогенная радиофизика, техника СВЧ, бесконтактные методы диагностики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Гордиенко Юрий Емельянович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика материалов, нанoeлектроника и нанотехнологии. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Ларкин Сергей Юрьевич, канд. техн. наук, генеральный директор ЗАО «НПК Наука». Научные интересы: нанoeлектроника и нанотехнологии, сенсoeлектроника СВЧ, системы неразрушающего контроля. Адрес: Украина, 03148, Киев, пр. 50-летия Октября, 2-б, тел. (044)236-10-85.