



## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРНЫХ ЗОНДОВ ДЛЯ СММ

ГОРДИЕНКО Ю.Е., КАМЫШАН А.А.,  
ЛАРКИН С.Ю.

Анализируется зависимость исходной и рабочей добротности широко применяемых в сканирующей микроволновой микроскопии (СММ) ближнеполевых резонаторных зондов с коаксиальной измерительной апертурой от размера накопительной области. Анализ осуществляется по результатам численных оценок с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в решении электродинамической задачи на собственные значения резонансной системы. Выполняется сравнение с оценками по приближенным соотношениям и результатам эксперимента.

### 1. Введение

Микроволновая микроскопия в настоящее время является перспективной областью сканирующей зондовой микроскопии наряду с атомно-силовой (АСМ) и сканирующей туннельной микроскопией (СТМ). Можно назвать ряд её достоинств, связанных с более глубоким проникновением СВЧ поля в объект исследования и особенностями его взаимодействия с материалом, которые определяются величиной диэлектрической и магнитной проницаемостей. Значение этих параметров связано со многими физическими и химическими свойствами материала, поэтому СММ, в принципе, предполагает построение изображений пространственного распределения значительного количества свойств различных материалов. Это выгодно отличает СММ от АСМ и СТМ.

Прежде всего, очевидна эффективность применения СММ для микродиагностики полупроводников. Практика разработки и внедрения СВЧ методов безэлектродного контроля параметров полупроводниковых материалов [1] показала их широкие возможности и перспективы. В СММ могут быть использованы те же принципы и алгоритмы контроля, однако реализуются они на основе так называемых ближнеполевых СВЧ зондов. Особенно перспективными в СММ являются ближнеполевые резонаторные зонды с коаксиальной измерительной апертурой [2].

Значение удельной электропроводности полупроводников может находиться в диапазоне от  $10^{-10}$  (Ом·см) $^{-1}$  до  $10^3$  (Ом·см) $^{-1}$ . Поэтому полупроводниковые объекты характеризуются широким интервалом величины СВЧ потерь. С учетом диэлектрических потерь в решет-

ке реальное значение  $\operatorname{tg} \delta$  полупроводников на СВЧ приходится на интервал от  $10^{-4}$  до  $10^2$ .

Из-за этой особенности в СММ полупроводников существует проблема одновременного повышения пространственной разрешающей способности (ПРС) и контрастности микродиагностики. Отметим, что контрастность в СММ определяется чувствительностью датчика к изменению величины контролируемого параметра объекта.

Датчик СММ строится на основе СВЧ зонда, как первичного измерительного преобразователя. Поэтому частичное снятие указанной проблемы в первую очередь целесообразно искать в оптимальном выборе электродинамического конструктива ближнеполевого резонаторного зонда и дальнейшей оптимизации его геометрии по эксплуатационным критериям.

Целью данной работы является проведение количественного сопоставительного анализа перспективных для СММ полупроводников ближнеполевых резонаторных зондов с позиции достижения максимальных значений ПРС и чувствительности.

В задачи такого анализа должны входить: количественные оценки зависимостей значения рабочей добротности зондов и их чувствительности к изменению  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  объекта при заданных параметрах измерительной апертуры, определяющих ПРС; оценки направлений одновременного повышения ПРС и контрастности изображений СММ полупроводников в различных диапазонах значения их удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости.

### 2. Основные положения

Резонаторные зонды для СММ отличаются от апертурных резонаторных измерительных преобразователей, применяемых в системах СВЧ контроля параметров полупроводниковых материалов, так называемым ближнеполевым взаимодействием с объектом. Это взаимодействие характеризуется высокой локализацией поля, исходящего из резонатора в объект.

Как уже упоминалось, наиболее широко применяются в СММ резонаторные зонды с коаксиальной измерительной апертурой (КИА). У них острие зонда, типичное для сканирующей зондовой микроскопии, является окончанием центрального проводника коаксиала, канализирующего СВЧ поле в объект. Основной объем резонатора может быть также коаксиальным, возбуждаемым на низшем ТЕМ виде колебаний (рис. 1, а, б, в). На рабочих частотах более  $10^{10}$  Гц целесообразно использовать объемные резонаторы [3,4] на одном из поперечных видов колебаний (рис. 1, г, д).

Как показывают отдельно проведенные исследования [5], ПРС датчиков на основе резонаторных зондов с КИА определяется размером сечения острия центрального проводника  $R_{1t}$  и его формой (рис. 2). Размер внешней части коаксиала  $R_{2t}$  измерительной апертуры слабо влияет на ПРС в пределах соотноше-

ния  $10^2 > \frac{R_{2t}}{R_{1t}} > 5$ . От величины  $R_{2t}$  существенно зависит полное излучение СВЧ энергии из резонатора [6].

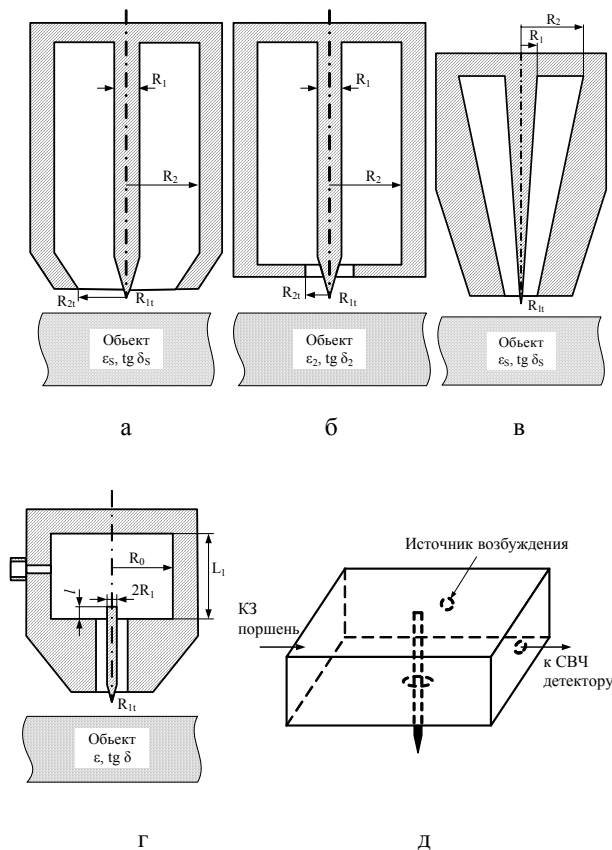


Рис. 1. Схематическое изображение резонаторных зондов с КИИА

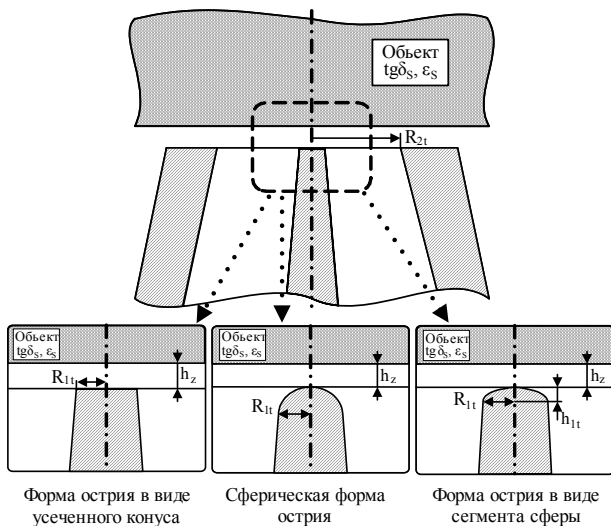


Рис. 2. Возможные варианты геометрии апертурного узла

Чувствительность датчиков в технике СВЧ контроля параметров полупроводников выражается через изменение добротности  $(\frac{\Delta Q}{Q})$  и резонансной частоты  $(\frac{\Delta f}{f})$  резонаторных зондов, которые вызываются включаемым в апертуру объектом [1,7]. Следует за-

метить, что формируемое при СММ изображение отражает пространственное распределение неоднородности величины заданного параметра на фоне его среднего значения. Поэтому чувствительность датчика в СММ будет зависеть от этого среднего значения. В целом оценка чувствительности датчиков к различным параметрам объекта в СММ является существенно более сложной задачей по сравнению с оценкой ПРС.

Для предварительного приближенного анализа взаимосвязи чувствительности зондов с геометрией апертуры и общего конструктива воспользуемся следующими соотношениями, вытекающими из известных физических соображений.

Рабочую добротность резонаторного зонда можно представить выражением:

$$Q = 2\pi f_0 \frac{W_{зап}}{P_{пот}} = 2\pi f_0 \varepsilon_0 \frac{\int_V \varepsilon E^2 dV}{P_{ст} + P_{изл.0} + \int_{V_s} \sigma_s E^2 dV} \quad (1)$$

где  $f_0$  – резонансная частота зонда;  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, входящей в различные части объема  $V$  электродинамической системы;  $E$  – амплитудное значение напряженности СВЧ поля в различных частях электродинамической системы;  $V_s, \sigma_s$  – включаемый в поле объем объекта и удельная электропроводность его материала;  $P_{ст}$  – СВЧ потери в стенках зонда;  $P_{изл}$  – СВЧ потери на излучение из зонда.

Напряженность СВЧ поля  $E$ , значение  $\varepsilon_s$  и  $\sigma_s$  являются функциями координат. Связанные с добротностью зонда сигналы изображения в СММ формируются как её изменение  $(\frac{\delta Q}{Q})$ , вызванное в первую очередь изменением удельной электропроводности объекта  $\frac{\delta \sigma_s}{\sigma_s}$ , а также других его параметров (например  $\frac{\delta \varepsilon_s}{\varepsilon_s}$ ;  $\frac{\delta h_z}{h_z}$ ). При этом указанные изменения параметров объекта влияют на

величину  $\frac{\delta Q}{Q}$  не только через прямо входящие в (1) их величины, а и опосредовано через их влияние на распределение поля  $E$  и значения  $P_{ст}$  и  $P_{изл}$ .

Кроме сигналов, связанных с изменением добротности зонда, в СММ и СВЧ технике контроля параметров полупроводников и диэлектриков широко используются сигналы, связанные с изменением резонансной частоты зонда  $(\frac{\delta f}{f})$ , вызванного изменением диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_s$ .

Непосредственно сигналы  $\frac{\delta Q}{Q}$  и  $\frac{\delta f}{f}$  являются фундаментальными, из которых формируются производ-

ные, например, изменение коэффициента СВЧ передачи или отражения зонда, фазовый сдвиг СВЧ колебания и др.

Выражение  $\frac{\delta Q}{Q}$  можно получить из (1), дифференцируя его по контролируемому параметру с учетом зависимости всех входящих в (1) величин от этого параметра.

Выражение  $\frac{\delta f}{f}$  получается аналогично из известного представления [7]

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta W_{\text{зап}}}{W_{\text{зап}}} = \frac{\int_{V_s} (\epsilon_s - 1) E^2 dV}{2 \int_V \epsilon E^2 dV}, \quad (2)$$

где  $\frac{\Delta f}{f}$  – изменение резонансной частоты зонда, вызванное включением в его апертуру объекта объемом  $V_s$ ;  $\Delta W_{\text{зап}}$  – изменение запасаемой СВЧ энергии в полной электродинамической системе зонда, связанное с включением объекта.

Из (2) очевидным образом следует, что наиболее существенно величина  $\frac{\Delta f}{f}$  зависит от  $\epsilon_s$  объекта. Это позволяет заключить, что

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \left( \frac{\Delta f}{f} \right) \quad (3)$$

в первую очередь образует сигнал в СММ, связанный с неоднородностью распределения  $\epsilon_s$  по поверхности.

Однако, учитывая зависимость напряженности поля  $E$  в объекте под зондом от величины зазора  $h_z$  между ними, необходимо предполагать возможность образования второго сигнала:

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\partial}{\partial h_z} \left( \frac{\Delta f}{f} \right). \quad (4)$$

Этот сигнал связан с неровностью поверхности объекта. На практике оба сигнала (3) и (4) оказываются совмещенными и требуются дополнительные приемы их разделения.

Представленное рассмотрение сигналов  $\frac{\delta Q}{Q}$  и  $\frac{\delta f}{f}$  является удобным для демонстрации и исследования различных способов увеличения многопараметровости СММ диагностики полупроводников и диэлектриков. Примером может служить развитый в [8] фотомодуляционный вариант образования сигналов в технике СВЧ контроля параметров полупроводников.

Выражения (1)-(4) не представляется возможным развернуть аналитически для рассматриваемых резонаторных зондов. Однако в некоторых случаях можно

воспользоваться следующим вариантом приближенного анализа для оценки свойств сигналов.

Например, при СММ кремния в процессах различной его обработки можно исходить из неизменности и известности величины его диэлектрической проницаемости на СВЧ ( $\epsilon_s = 12$ ). Тогда выражение (2) может представлять результат экспериментально измеряемой величины, характеризующей степень включения объекта в СВЧ поле зонда:

$$K = \frac{\int E^2 dV}{2 \int_V \epsilon E^2 dV} = \frac{\Delta f}{f(\epsilon_s - 1)}. \quad (5)$$

Значение этого параметра может оказаться полезным для анализа различных сигналов  $\frac{\delta Q}{Q}$ .

К примеру, если не учитывать неоднородность значения  $\sigma_s$  непосредственно в области ближнего поля под острием, то можно получить простое выражение для оценки сигнала  $\left(\frac{\delta Q}{Q}\right)_\sigma = Q^{-1} \frac{\partial Q}{\partial \sigma_s}$ :

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)_\sigma &= \sigma_s \frac{K + \frac{\sigma_s}{\omega \epsilon_0} \frac{\partial K}{\partial \sigma_s}}{\left(Q_0^{-1} + \frac{\sigma_s K}{\omega \epsilon_0}\right) \sigma_s} = \\ &= \frac{\Delta f}{f} \frac{\sigma_s}{2\pi f_0 \epsilon_0 (\epsilon_s - 1)} \frac{1 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^{-1} \sigma_s \frac{\partial}{\partial \sigma_s} \left(\frac{\Delta f}{f}\right)}{Q_0^{-1} + \frac{\sigma_s}{2\pi f_0 (\epsilon_s - 1)} \frac{\Delta f}{f}} \frac{\delta \sigma_s}{\sigma_s} \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$Q_0 = 2\pi f_0 \epsilon_0 \frac{\int_V \epsilon E^2 dv}{P_{\text{ст}} + P_{\text{изл}}}. \quad (7)$$

В этих выражениях:  $Q_0$  – экспериментально измеряемая исходная добротность резонаторного зонда в отсутствие объекта;  $\frac{\Delta f}{f}$  – экспериментально измеряемое среднее значение изменения резонансной частоты зонда при взаимодействии с объектом;  $\epsilon_s$  – известная относительная диэлектрическая проницаемость объекта;  $\frac{\delta \sigma_s}{\sigma_s}$  – относительное отклонение удельной проницаемости материала объекта от среднего значения.

Представленный сигнал  $\frac{\delta Q}{Q}$  фактически характеризует чувствительность зонда к отклонению  $\frac{\delta \sigma_s}{\sigma_s}$ . Если

этот сигнал выделять методом передачи [9], то он будет представлен относительным изменением напряжения СВЧ детектора, подключенного на выходе зонда в резонансе.

Возвращаясь к задаче сопоставительного анализа различных зондов по чувствительности, необходимо отметить следующее. Для повышения чувствительности резонаторного зонда ко всем параметрам исследуемого образца целесообразно максимально увеличивать его исходную добротность  $Q_0$ . Это вытекает из выражений (1), (6), (7) и количественно описывается условием:

$$\int_{V_s} \sigma_s E^2 dV \gg (P_{ст} + P_{изл}) \quad (8)$$

Кроме того, рабочая добротность зонда

$$Q = [Q_0^{-1} + \frac{1}{2\pi f_0 \epsilon_0} \frac{\int_{V_s} \sigma_s E^2 dV}{\int_V \epsilon E^2 dV}]^{-1} \quad (9)$$

не должна быть ниже величины, ограничивающей инструментальную точность выделения сигналов датчика. Это накладывает ограничение на степень включения объекта в СВЧ поле зонда (5).

Сравнительную оценку величины  $Q_0$  резонаторных зондов, представленных на рис. 1, а, б, без учета потерь на излучение можно произвести руководствуясь известной формулой для добротности полуволнового коаксиального резонатора на основном ТЕМ виде колебаний:

$$Q_0 = \frac{2L_0}{\delta_{ст}} \frac{\ln(\frac{R_2}{R_1})}{4 \ln(\frac{R_2}{R_1}) + L_0 (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})}, \quad (10)$$

где  $L_0$  – длина резонатора;  $\delta_{ст}$  – толщина скин-слоя материала стенок.

Из последнего выражения следует оптимальное соотношение  $R_2/R_1 = 3,6$  по максимуму значения добротности. Значение  $R_1$  ограничено допустимой конусностью перехода центрального проводника к острию с сечением  $2R_{1t} < 0,01$  мм. Значение  $Q_0$  можно увеличивать, удлиняя резонатор. Однако при этом будет уменьшаться чувствительность по сигналу  $\frac{\delta f}{f}$ .

Добротность конусного коаксиального резонатора (ККР) (см. рис. 1, в) не описывается столь простым соотношением. Выражения для добротности цилиндрических резонаторов на поперечных видах колебаний представляются следующим образом [10].

Для ТМ видов колебаний в цилиндрическом резонаторе:

$$Q_0 = \frac{1}{\delta_{ст}} \frac{R_0}{1 + \frac{2R_0}{L_0}}; \quad (11)$$

для ТЕ видов:

$$Q_0 = \frac{R_0}{\delta_{ст}} \frac{[1 - (\frac{m}{\mu_{mn}})^2] \cdot [\mu_{mn}^2 + (\frac{p\pi R_0}{L_0})^2]}{\mu_{mn}^2 + (\frac{p\pi R_0}{L_0})^2 + (1 - \frac{2R_0}{L_0})(\frac{p\pi R_0}{L_0 \mu_{mn}})^2} \quad (12)$$

В этих формулах:  $R_0$  – радиус резонаторов;  $\delta_{ст}$  – толщина скин-слоя металлических стенок;  $\mu_{mn}$  –  $n$ -й корень производной функции Бесселя первого рода  $m$ -го порядка.

Руководствуясь приведенными выше соотношениями, можно предварительно определиться с оптимальным выбором геометрии накопительной части различных видов резонаторных зондов для СММ.

Оценку их рабочей добротности и чувствительности в диапазоне заданных значений  $\epsilon_s$  и  $\sigma_s$  объекта можно производить только путем численного моделирования электродинамической системы – резонаторный зонд с объектом.

Практика использования квазистатического приближения [2, 11] и метода эквивалентных схем [12] в теории резонаторных зондов для СММ не подтвердила убедительно адекватность основанных на них моделей. Поэтому в современных исследованиях все больше применяются прямые методы численного решения возникающих в СММ электродинамических задач. В частности, в данной работе моделирование осуществлялось путем решения волнового уравнения для изучаемой системы с использованием метода конечных элементов [13].

### 3. Результаты сравнительных оценок и их анализ

На рис. 3 представлены результаты численных оценок зависимости исходной и рабочей добротности резонаторных зондов с полностью коаксиальным конструктивом (КРЗ), изображенных на рис. 1, а, б, в, от длины резонатора. При этом конструктив в виде цилиндрического коаксиального резонатора (ЦКР) выбран с размерами  $R_1 = 0,24$  мм;  $R_2 = 1,065$  мм; конструктивы с конусным коаксиальным резонатором (ККР) и с коаксиальным резонатором с укорачивающей емкостью (КРУЕ) взяты с  $R_1 = 1,9$  мм;  $R_2 = 8$  мм. Коаксиальная измерительная апертура во всех конструктивах имела размеры  $R_{1t} = 0,025$  мм и  $R_{2t} = 0,6$  мм. Электропроводность материала стенок взята  $\sigma_m = 5,8 \cdot 10^7$  см/м.

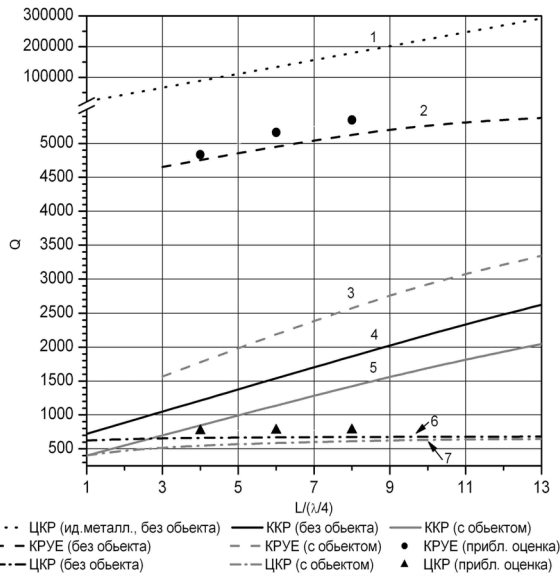


Рис. 3. Зависимость исходной и рабочей добротностей трех видов КРЗ от длины резонатора

При оценке рабочей добротности зондов  $Q$  объект характеризовался параметрами  $\epsilon_s = 12$ ;  $\text{tg}\delta_s = 10^{-2}$ . Отдельными точками в области графиков представлены оценки указанных параметров по приближенным формулам (10) для ЦКР и КРУЕ.

Относительно хорошее совпадение зависимостей 2, 6 с оценками по приближенным формулам подтверждают работоспособность использованного алгоритма применения метода конечных элементов (МКЭ) и его программной реализации.

Установленные зависимости дают количественное представление о возможности увеличения исходной и рабочей добротности разных конструктивов.

График 1 построен без учета потерь в стенках ЦКР и иллюстрирует влияние потерь на излучение, которые для рассматриваемой апертуры незначительны.

В целом можно заключить, что по предельно достижимому значению исходной добротности на частоте  $8 \cdot 10^9$  Гц среди коаксиальных конструктивов превосходит конструктив с укорачивающей емкостью (см. рис. 1, б).

На частотах более  $10^{10}$  Гц предпочтение имеет цилиндрический конструктив по сравнению с коаксиальным (таблица). В этой таблице приведены исходные частота и добротность цилиндрического резонаторного зонда, длина которого соответствовала 1, 2 и 3 полуволам рабочего колебания, а также частота и добротность при внесении объекта (с параметрами  $\epsilon_s = 12$  и  $\text{tg}\delta_s = 10^{-2}$ ). Помимо этих значений, рассчитанных с помощью МКЭ, в таблице приведены также значения исходной добротности, оцененной по формуле (11), которые подтверждают адекватность использования МКЭ.

На рис. 4 представлены зависимости  $\frac{Q_0}{Q_1} - 1 = f(L)$  КРЗ (см. рис. 1, а, б, в), характеризующие соотношение СВЧ потерь в образце с потерями в стенках при  $\text{tg}\delta_s = 10^{-2}$ . Из них видно, что условие (8) при этом значении  $\text{tg}\delta_s$  выполняется для КРУЕ при  $L < 3 \frac{\lambda}{4}$ . При этом, как видно из рис. 5, уменьшается относительное изменение частоты  $\frac{f_0}{f_1} - 1$ , вызванное внесением объекта в апертуру.

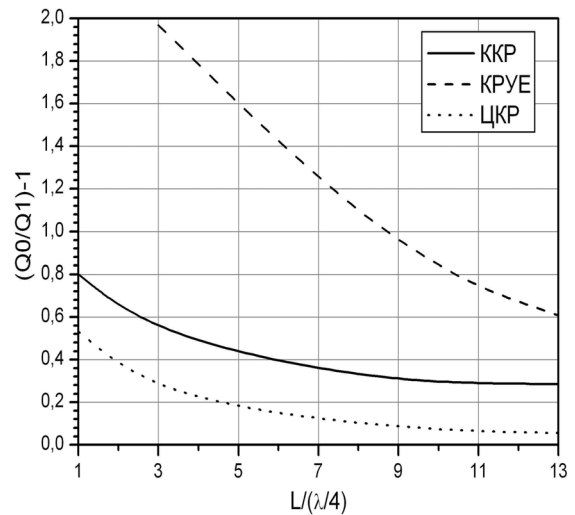


Рис. 4. Зависимость изменения добротности, связанного с включением объекта, для трех видов резонаторов от их длины

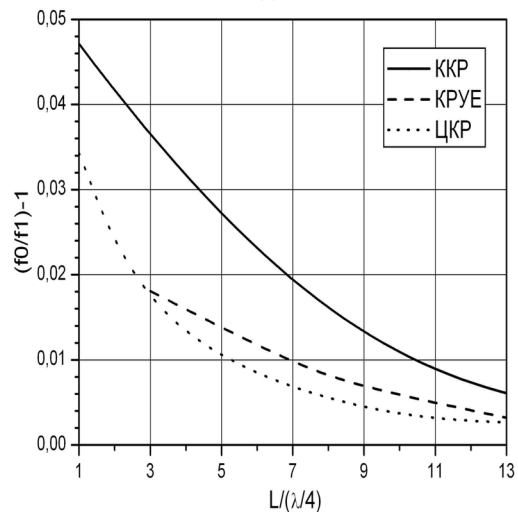


Рис. 5. Зависимость изменения частоты, связанного с включением объекта, для трех видов резонаторов от их длины

Следующим этапом сравнительных оценок является исследование зависимостей рабочих добротностей от  $\text{tg}\delta_s$  объекта. При одинаковом апертурном узле ( $R_{1t} = 0,025$  мм и  $R_{2t} = 0,6$  мм) должны проявиться особенности «выхода» поля резонатора в объект по энергетике, в то время как пространственное его

Кол-во полувольт	$f_0$ , МГц	$Q_0$	$Q_0$ , оцененная по формуле(11)	$f_1$ , МГц	$Q_1$	$(Q_0/Q_1)-1$
1	36643,15	5005,01	5115,855	36641,17	4217,05	0,187
2	36653,90	7153,39	7301,268	36647,26	5639,18	0,269
3	36651,89	8260,31	8513,555	36645,52	6204,44	0,331

распределение в объекте однозначно определяется размерами апертуры.

На рис. 6 показано отличие зависимостей  $Q = f(\operatorname{tg}\delta_s)$  для различных резонаторных зондов (см. рис. 1, а, б, в). Объект при этом располагался без зазора между

ними зондом. Длина КРЗ была принята равной  $L = 5 \frac{\lambda}{4}$ .

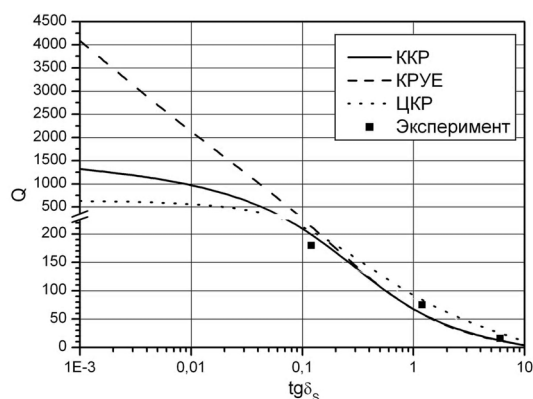


Рис. 6. Зависимость добротности трех видов КРЗ от тангенса угла диэлектрических потерь объекта

Из этих зависимостей вытекает, что выполнение условия (8) для всех разновидностей КРЗ имеет место только при  $\operatorname{tg}\delta_s > 10^{-1}$ .

#### 4. Заключение

В результате проведенных численных исследований и их анализа установлено:

1. Наиболее высоким достижимым значением исходной и рабочей добротности, а также чувствительности обладают резонаторные зонды коаксиального типа с укорачивающей емкостью в области апертуры.
2. Для реализации СММ в коротковолновой области (более  $10^{10}$  Гц) целесообразно использовать зонды на основе объемных резонаторов с Е и Н видом колебаний и апертурным узлом, который образуется оптимизированным коаксиальным выводом.
3. При построении микроволновых микроскопов для исследования низкоомных полупроводников, влагонесодержащих биообъектов и т.п. в широком частотном диапазоне удобным по эксплуатационным параметрам является зонд на основе конусного коаксиального резонатора.
4. Коаксиальные цилиндрические зонды со сравнимым сечением накопительной области и апертуры являются наименее оптимизированными по достижимым эксплуатационным параметрам.

**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. *Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale / Edited by S.V. Kalinin and A. Gruverman.* New York: Springer. 2007. 3. *Гордиенко Ю.Е.* Ближнеполевая сканирующая сверхвысокочастотная микродиагностика объектов в технологии электроники // *Нові технології: Наук. вісник ІЕНТ.* 2002. № 1. С. 3–6. 4. *Гордиенко Ю.Е., Гуд Ю.И., Ларкин С.Ю., Полетаев Д.А.* Электродинамические характеристики усовершенствованного резонаторного микрозонда для микроволновой микроскопии и микродиагностики // *Радиотехника.* 2009. Вып. 159. С. 302-308. 5. *Imtiaz Atif, Anlage S.M.* Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of near-field microwave microscope // *Jorn. of Appl. Phys.* 2006. № 100. 044304. 6. *Гордиенко Ю.Е., Гуд Ю.И., Полетаев Д.А.* Вклад колебательных и излучательных потерь в характеристики СВЧ преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой // *Радиотехника.* 2009. Вып. 157. С. 108-114. 7. *Гордиенко Ю.Е., Слипченко Н.И., Петров В.В.* Чувствительность СВЧ резонаторных измерительных преобразователей для микроволновой микроскопии // *Радиоэлектроника и информатика.* 2007. № 3. С. 19-23. 8. *Gordienko Yu.E., Borodin B.G., Smuglii V.I.* Microwave Photomodulation Method for the Study of Recombination Processes in Semiconductors // *Telecommunication and Radio Engineering.* 1998. Vol. 52, N 2. P. 47–52. 9. *Валитов Р.А., Дюбо С.Ф., Макаренко Б.И. и др.* Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах: Методы и техника / Под. ред. Р.А. Валитова, Б.И. Макаренко. М.: Радио и связь, 1984. 296 с. 10. *Харвей А. Ф.* Техника сверхвысоких частот. Т.1. : Пер. с англ. под ред. В.И. Сушкевича. М.: Сов. радио, 1965. 784 с. 11. *Misra D.* A quasistatic analysis of open ended coaxial lines // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1987. V. 35. P. 925-928. 12. *Gajda G., Stuchly S.* An equivalent circuit of an open-ended coaxial line // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1983. V. 32. P. 506-508. 13. *Сеерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.

Поступила в редколлегию 11.03.2011

**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: СВЧ диагностика материалов, наноэлектроника и нанотехнологии. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

**Камышан Артем Алексеевич**, стажер-исследователь кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: численно-аналитическое моделирование СВЧ структур. 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: наноэлектроника и нанотехнологии, сенсозлектроника СВЧ, системы неразрушающего контроля. Адрес: Украина, 03148, Киев, пр. 50-летия Октября, 2-б, тел. (044)236-10-85.