

**Б. Э. Бекиров, И. В. Иванченко, Н. А. Попенко, Р. Е. Чернобровкин**  
 Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
 12, ул. Ак. Проскуры, 61085, Харьков, Украина  
 E-mail: [buran@ire.kharkov.ua](mailto:buran@ire.kharkov.ua)

**РЕЗОНАНСНАЯ ЯЧЕЙКА СПЕКТРОМЕТРА ЭПР  
 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗЦОВ С ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ**

Проведен сопоставительный анализ электродинамических характеристик резонансных ячеек в виде прямоугольного и цилиндрического резонаторов для спектрометров электронного парамагнитного резонанса 3-см диапазона с точки зрения обеспечения максимальной чувствительности спектрометра при исследовании образцов с высокой проводимостью. Полученные результаты подтвердили увеличение чувствительности спектрометра при оптимальном расстоянии между стенкой прямоугольного резонатора и проводящим образцом. Ил. 10. Библиогр.: 13 назв.

**Ключевые слова:** резонансная ячейка, спектр ЭПР, чувствительность, образец.

Одними из широко исследуемых методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) объектов являются полумагнитные полупроводники (ПМП). Среди них можно особо выделить бесщелевые ПМП с высокой подвижностью носителей заряда и высокой проводимостью, у которых вклад в формирование спектров поглощения дает часть парамагнитных центров, сосредоточенная в скин-слое. В связи с этим при малых концентрациях парамагнитных центров в исследуемых образцах существенно повышаются требования к чувствительности спектрометра ЭПР, которая в значительной степени определяется электродинамическими свойствами используемой в нем резонансной ячейки.

Как правило, в качестве резонансных ячеек спектрометров ЭПР, работающих в 3-см диапазоне, используются прямоугольные и цилиндрические резонаторы, характеристики которых подробно проанализированы в работе [1]. Применению открытых резонаторов в высокочастотных спектрометрах (4- и 2-мм) посвящен ряд работ [2–5], где показана их эффективность и определены условия получения максимальной чувствительности. Также на сегодняшний день широко исследованы открытые диэлектрические резонаторы. Например, в работе [6] авторы продемонстрировали повышение плотности электромагнитного поля, обусловленную увеличением диэлектрической проницаемости используемых материалов. Для миниатюрных резонаторов из рутила авторы данной статьи получили добротность, в десятки раз превышающую добротность полых металлических резонаторов. Работа [7] посвящена описанию высокодобротной открытой резонансной структуры, состоящей из диэлектрической трубки, помещенной между двумя металлическими пластинами, при этом образцы размещаются внутри трубки. Использованию проходных резонаторов шепчущей галереи, применяемых в ЭПР-технике, посвящены работы [8, 9]. В работе [9] предложено использовать кристалли-

ческий диэлектрик (монокристалл лейкосапфира), легированный парамагнитными ионами хрома, в качестве резонансной ячейки спектрометра ЭПР со встроенной реперной магниторезонансной меткой. Величина собственной добротности, достигнутая авторами, составила 30 000...38 000.

Микрополосковые резонаторы также широко используются в ЭПР-исследованиях. Так, в работе [10] рассмотрена одна из таких структур. Данный тип резонаторов обладает меньшими значениями добротности по сравнению с полыми резонаторами, однако этот недостаток компенсируется высоким значением коэффициента заполнения электромагнитным полем образцов. К достоинствам микрополосковых резонаторов можно также отнести и их размеры, которые могут быть меньше, чем у полого резонатора.

Следует отметить, что, как правило, для каждого типа образцов, исследуемых методом ЭПР, приходится в той или иной степени модернизировать резонансную ячейку спектрометра.

Целью настоящей работы является проведение сопоставительного анализа электродинамических характеристик резонансных ячеек в виде прямоугольного и цилиндрического резонаторов для спектрометров ЭПР 3-см диапазона с точки зрения обеспечения максимальной чувствительности спектрометра при исследовании образцов с высокой проводимостью.

**1. Чувствительность спектрометра.**

Как известно, чувствительность ЭПР-спектрометра определяется минимальным количеством спинов в исследуемом веществе, которые можно обнаружить, и зависит от ряда факторов [1]:

$$N_{\min} = \frac{V_S T_S K}{Q_u \eta g^2 S(S+1) \omega_0} \left( \frac{\Delta H_{pp}}{H_0} \right) \times \left( [F_k - 1 + (t + F_{amp} - 1)L] \frac{T_d}{P_w} \Delta f \right)^{1/2}.$$

Здесь  $V_s$  – объем образца;  $T_s$  – температура образца;  $K$  – постоянный коэффициент;  $Q_u$  – собственная добротность;  $\eta$  – коэффициент заполнения образца магнитным полем:

$$\eta = \frac{\int_{sample} H_1^2 dV}{\int_{resonator} H_2^2 dV},$$

где  $H_1$  – напряженность магнитного поля в образце;  $H_2$  – напряженность магнитного поля в резонаторе.

$$\text{Множитель} \left[ \left( F_k - 1 + (t + F_{amp} - 1)L \right) \frac{T_d \Delta f}{P_w} \right]$$

характеризует шумы в тракте прохождения сигнала. В данном множителе  $F_k$  – коэффициент шума, отнесенный ко входу детектора,  $t$  – шумовая температура кристалла,  $L$  – величина потерь преобразования,  $T_d$  – температура детектора,  $P_w$  – мощность СВЧ-излучения, падающего на кристалл,  $\Delta f$  – полоса пропускания системы.

Применяя высококачественную регистрирующую аппаратуру, в частности, используя супергетеродинную схему измерений, высокочастотную модуляцию магнитного поля и синхронное детектирование, дальнейшее повышение чувствительности спектрометра достигается оптимизацией резонансных ячеек спектрометров применительно к типу исследуемых образцов.

Как видно из формулы (1), минимально обнаруживаемое количество спинов обратно пропорционально произведению  $\eta Q_u$ , следовательно, для достижения максимальной чувствительности спектрометра необходимо получить максималь-

ное значение данного произведения. Поэтому этот параметр и выбран для сравнения рассматриваемых резонаторов.

**2. Расчет различных типов резонансных ячеек.** Геометрические параметры рассматриваемых цилиндрического и прямоугольного резонаторов приведены на рис. 1. Анализ характеристик цилиндрического резонатора проведем для типа колебания  $H_{012}$ . При этом для возбуждения данного колебания на резонансной частоте  $f = 9,75$  ГГц размеры резонатора составляют:  $R_{цил} = 20,5$  мм,  $h_{цил} = 41$  мм. Собственная добротность резонатора равна  $Q = 3010$  (в расчете использовались медные стенки с удельной проводимостью  $\sigma_{Cu} = 58\,100\,000$  См/м). Для прямоугольного резонатора рассмотрим колебание  $H_{101}$ . Размеры резонатора составляют:  $a = 23$  мм,  $b = 10$  мм,  $c = 19$  мм. Резонансная частота и собственная добротность при этом будут:  $f_{рез} = 10,23$  ГГц,  $Q = 7740$ .

Далее исследуем влияние на характеристики указанных выше резонаторов цилиндрических образцов полумагнитных полупроводников, имеющих как высокую удельную проводимость  $\sigma = 500\,000$  См/м, так и высокую диэлектрическую постоянную  $\epsilon = 18$ , а также диэлектрические потери  $\text{tg} \alpha = 0,001$ . Толщина скин-слоя вычисля-

лась по приближенной формуле  $\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_m f}}$ ,

где  $\rho$  – удельное сопротивление,  $\mu_m$  – относительная магнитная проницаемость,  $f$  – частота (все величины выражены в системе единиц СИ) и для данного образца равна  $\delta = 7$  мкм.

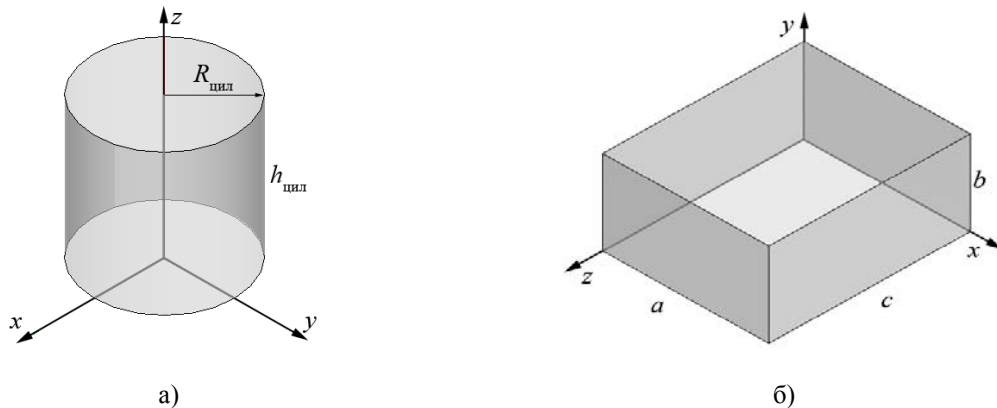


Рис. 1. Схематическое изображение цилиндрического (а) и прямоугольного (б) резонаторов

В зависимости от соотношения между высотой цилиндра и его радиусом исследуемые образцы можно разделить на 2 вида: стержень и диск. Для образца в виде стержня изменяемым геометрическим параметром была высота стержня, а для диска – радиус.

Сравнение характеристик резонаторов в зависимости от площади образцов будем проводить по следующим параметрам: добротность, коэффициент заполнения, произведение добротности на коэффициент заполнения. Последняя величина пропорциональна чувствительности

спектрометра, поскольку характеристики регистрирующей части спектрометра остаются неизменными. В дальнейшем мы будем оперировать параметром «чувствительность», имея в виду произведение добротности на коэффициент заполнения. Выбор площади поверхности образца в качестве переменной обусловлен тем, что СВЧ-поле сосредоточено в скин-слое.

**Цилиндрический резонатор.** Рассмотрим цилиндрический резонатор с образцами в виде стержня и диска, которые расположены в центре резонатора, т. е. в максимуме магнитной компоненты электромагнитного (ЭМ) поля. Ось симметрии образца совпадает с осью  $OZ$  (рис. 2).

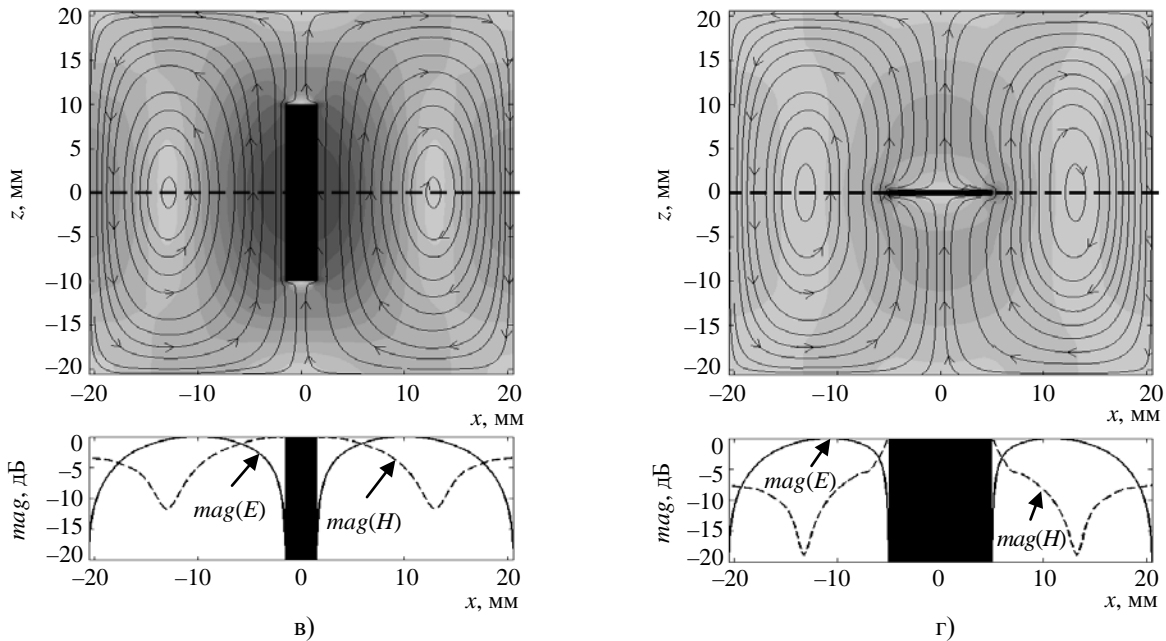


Рис. 2. Распределение магнитного поля резонансного колебания  $H_{012}$  в цилиндрическом резонаторе с образцом в виде стержня с максимальной высотой 20 мм (а) и в виде диска с максимальным радиусом 5 мм (б). Распределения интенсивности магнитной и электрической компонент поля вдоль оси  $Ox$  (в, г)

На рис. 2 представлены силовые линии магнитного поля резонансного колебания  $H_{012}$  для образца в виде стержня и в виде диска.

В случае стержня увеличение его высоты приводит к возмущению магнитной компоненты ЭМ-поля и к существенно меньшему возмущению электрической компоненты ЭМ-поля (рис. 2, а), в то время как для диска увеличение его радиуса приводит к возмущению как электрической, так и магнитной компонент резонансного ЭМ-поля (рис. 2, б).

Рассмотрим влияние представленных неоднородностей на добротность  $Q$  и коэффициент заполнения  $\eta$ . При увеличении площади стержня добротность резонатора уменьшается существенно меньше, чем при увеличении площади диска (рис. 3, а). Эти отличия хорошо объясняются с точки зрения различия возмущения распределе-

Для определенности предположим, что постоянное магнитное поле, создаваемое катушками, направлено вдоль оси  $OY$ .

В процессе счета высота стержня варьировалась в пределах  $0,5 \text{ мм} < h_{\text{ст}} < 20 \text{ мм}$  с шагом 0,5 мм, а его радиус оставался постоянным  $R_{\text{ст}} = 1,5 \text{ мм}$ . Для образца в виде диска радиус изменялся в пределах  $0,5 \text{ мм} < R_{\text{диск}} < 7,5 \text{ мм}$  с шагом 0,5 мм, а высота оставалась постоянной  $h_{\text{диск}} = 0,5 \text{ мм}$ .

В расчете коэффициента заполнения учитывались только компоненты магнитного поля, которые перпендикулярны постоянному магнитному полю, а именно:  $H_z$ - и  $H_x$ -компоненты поля.

ния ЭМ-поля для данного резонансного колебания (рис. 2). Коэффициент заполнения для диска становится больше, чем для стержня, начиная с площади  $S > 25 \text{ мм}^2$ , что объясняется тем, что образец в виде диска фактически «перегораживает» линии магнитного поля (рис. 2, б).

Сравнение чувствительностей для цилиндрического резонатора с указанными выше образцами различной формы показывает, что при площадях образцов до  $25 \text{ мм}^2$  форма образца не влияет на величину чувствительности (рис. 4). Дальнейшее увеличение площади образца приводит к существенному увеличению чувствительности для образцов в виде стержня. Полученные отличия могут быть объяснены с помощью представленных графиков изменения добротности и коэффициента заполнения как функций площади образца (рис. 3).

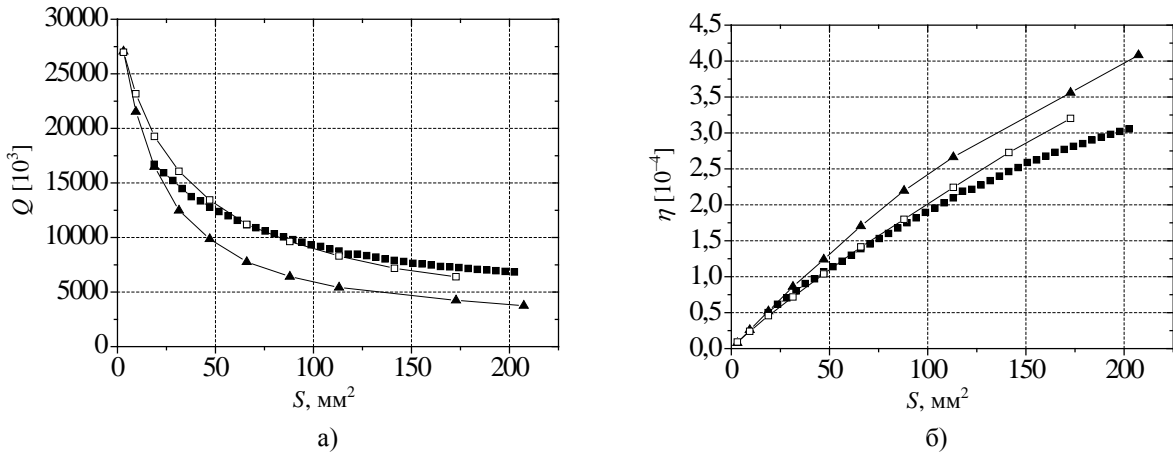


Рис. 3. Зависимость собственной добротности (а) и коэффициента заполнения (б) цилиндрического резонатора с образцами в виде стержня и диска: ■ – стержень; ▲ – диск; □ – диск лежит на ребре

Для образца в виде стержня уменьшение коэффициента заполнения примерно на 20 % компенсируется существенно большей добротностью (примерно на 30–45 % больше, чем для образца в виде диска). Отметим, что максимальная величина чувствительности достигается при площади стержня  $S = 174 \text{ мм}^2$  ( $h_{\text{ст}} = 17 \text{ мм}$ ).

Изменение положения образца в виде диска в цилиндрическом резонаторе, а именно расположение его параллельно оси  $OZ$ , позволяет при увеличении площади диска получить такую же величину чувствительности, как и для образцов в виде стержня (рис. 4, кривая □). Отметим, что в данном случае возмущение распределения поля  $H$ -компоненты минимизируется, как и в случае со стержнем, что наглядно иллюстрируется распределением ЭМ-поля (рис. 5).

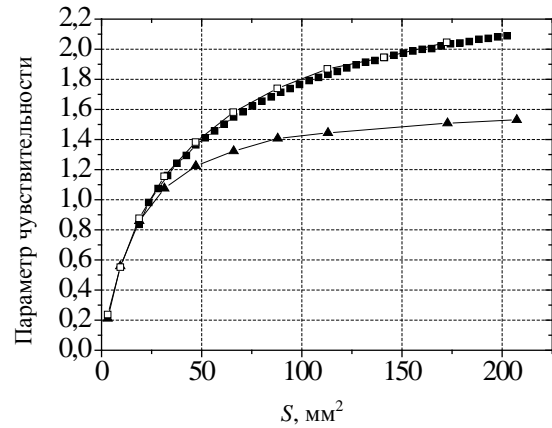


Рис. 4. Зависимость параметра чувствительности для цилиндрического резонатора с различной формой образцов от площади их поверхности: ■ – стержень; ▲ – диск; □ – диск лежит на ребре

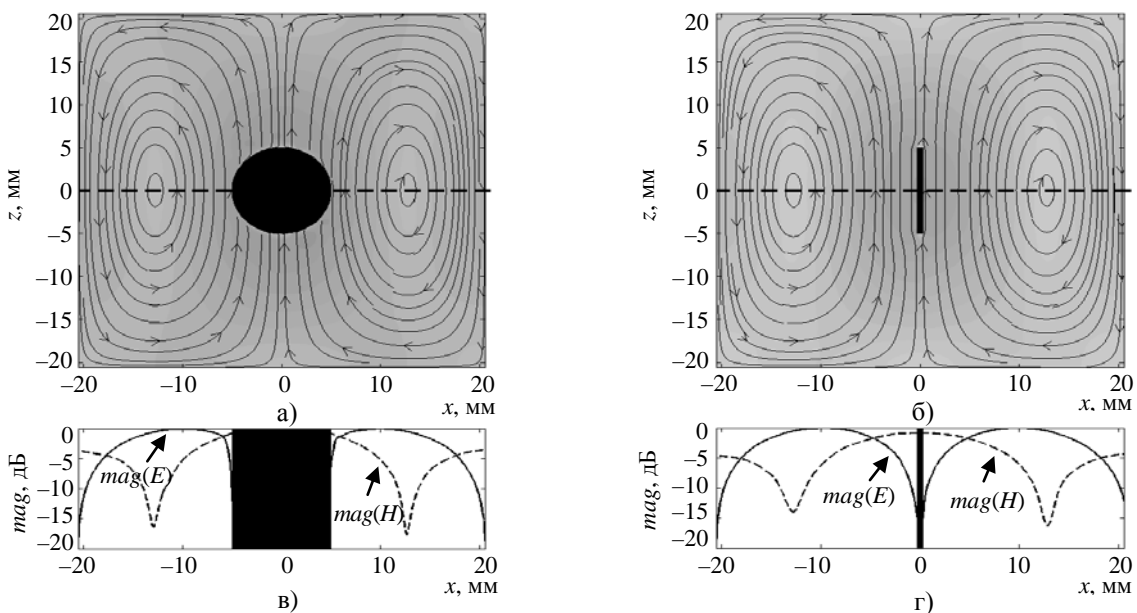


Рис. 5. Распределение магнитного поля резонансного колебания  $H_{012}$  в цилиндрическом резонаторе с образцом в виде диска, лежащего на ребре (а, б). Распределения интенсивности магнитной и электрической компонент поля вдоль оси  $Ox$  (в, г)

Сравнительный анализ распределения поля для такой конфигурации показывает, что возмущение магнитного поля гораздо больше в плоскости  $XOZ$  (рис. 5, а), чем в плоскости  $YOZ$  (рис. 5, б). Размеры образца:  $R_{\text{обр}} = 5 \text{ мм}$ ,  $h_{\text{обр}} = 0,5 \text{ мм}$ ,  $S_{\text{обр}} = 172 \text{ мм}^2$ ,  $\eta = 32,07 \cdot 10^{-5}$ ,  $Q = 6460$ ,  $\eta Q = 2,072$ .

Полученные данные позволяют рекомендовать для данной конфигурации резонатора

применение образцов в виде стержня или диска, расположенных параллельно оси  $OZ$ .

**Прямоугольный резонатор.** Рассмотрим прямоугольный резонатор с колебанием  $H_{101}$ . Постоянное магнитное поле направлено параллельно оси  $OZ$ . Образец в виде диска параллелен плоскости  $YOZ$  (рис. 6). В процессе счета варьируются как толщина диска  $h$  в пределах  $0,5 \text{ мм} < h < 14 \text{ мм}$  с шагом  $0,5 \text{ мм}$ , так и его радиус  $R_{\text{диск}}$  в пределах  $1,5 \text{ мм} < R_{\text{диск}} < 4,5 \text{ мм}$  с шагом  $1 \text{ мм}$ .

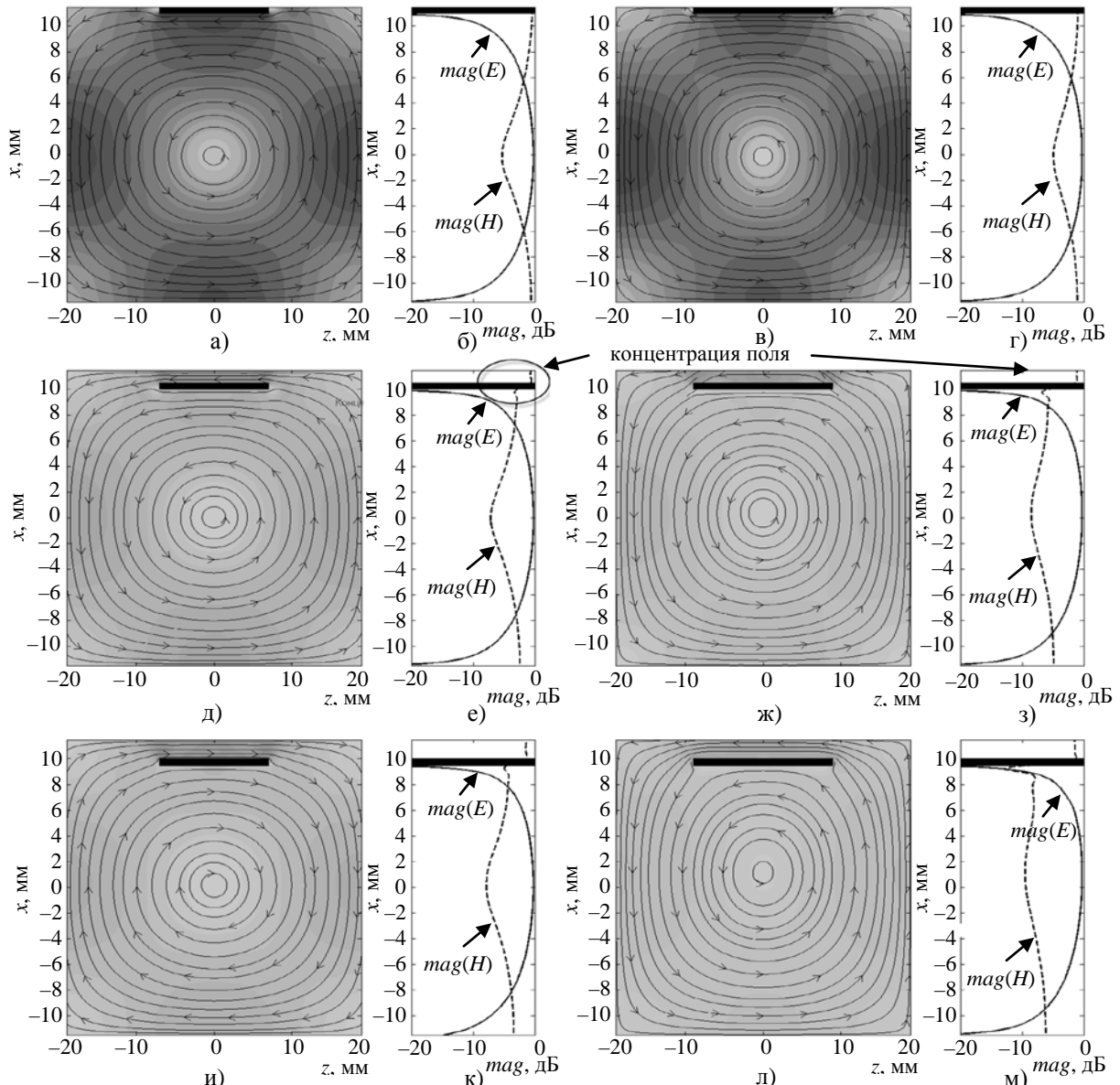


Рис. 6. Распределение магнитного поля в прямоугольном резонаторе с образцом в виде диска с  $R_{\text{диск}} = 3,5 \text{ мм}$  (а, д, и) и  $R_{\text{диск}} = 4,5 \text{ мм}$  (в, ж, л) при расстояниях образца от стенки  $D = 0 \text{ мм}$ ,  $D = 1,5 \text{ мм}$  и  $D = 3 \text{ мм}$ . Распределения интенсивности магнитной компоненты поля вдоль оси  $OX$  (б, г, е, з, к, м)

При размещении образца на стенке резонатора в максимуме магнитного поля  $H$  при увеличении радиуса диска распределение ЭМ-поля резонансного колебания претерпевает незначи-

тельные изменения в центральной области резонатора (рис. 6).

Однако в реальных условиях эксперимента, как правило, между стенкой резонатора и

образцом располагается столик для крепления последнего, т. е. всегда есть зазор между стенкой и образцом. Как известно, увеличение добротности открытого резонатора может быть достигнуто при помещении проводящей ленты [11] вблизи одного из металлических зеркал резонатора. Мы применили этот подход в случае наших проводящих образцов и провели расчеты добротности, коэффициента заполнения и чувствительности в зависимости от положения образца в виде диска относительно стенки резонатора для различных радиусов образца. При этом расстояние между стенкой и образцом  $D$  изменялось в пределах  $0,5 \text{ мм} < D < 5 \text{ мм}$ .

Действительно, представленная зависимость чувствительности от расстояния  $D$  имеет максимум для расстояния от стенки  $D = 1,5 \text{ мм}$  при достаточно большом размере диска  $R_{\text{диск}} = 4,5 \text{ мм}$  (рис. 7). При уменьшении радиуса диска увеличение чувствительности при изменении расстояния от стенки резонатора становится незначительным. Наличие максимума на зависимости чувствительности от расстояния между проводящим образцом и стенкой резонатора можно объяснить, анализируя амплитудные распределения магнитной компоненты ЭМ-поля (рис. 6). Представленные картины поля для расстояния  $D = 1,0 \text{ мм}$  для двух радиусов диска показывают увеличение интенсивности ЭМ-поля вблизи стенки резонатора. Эффект проявляется сильнее для образцов с большим радиусом (рис. 6, а). Для образца с  $R_{\text{диск}} = 4,5 \text{ мм}$  амплитуда увеличивается на +5 дБ, в то время как для образца с  $R_{\text{диск}} = 3,5 \text{ мм}$  только на +3 дБ.

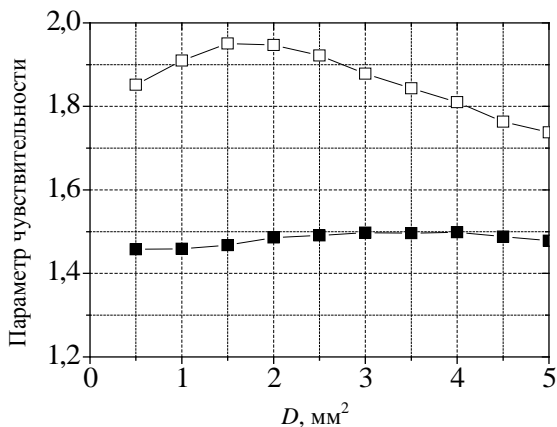


Рис. 7. Зависимость параметра чувствительности прямоугольного резонатора от расстояния образца в виде диска толщиной  $h = 0,5 \text{ мм}$  и радиусами:  $\square - R = 4,5 \text{ мм}$ ;  $\blacksquare - R = 3,5 \text{ мм}$  до стенки резонатора

Увеличение как радиуса, так и толщины диска приводит к уменьшению добротности резонатора (рис. 8, а), что связано с тем, что с увеличением площади образца увеличиваются резис-

тивные потери в образце. Для случая диска, когда зафиксирована высота образца  $h = 0,5 \text{ мм}$ , добротность резонатора уменьшается, следуя закону  $1/x$ . Для случая стержня, когда фиксируется радиус образца, зависимость добротности резонатора от площади образца выходит на определенный уровень, который тем выше, чем меньше радиус стержня.

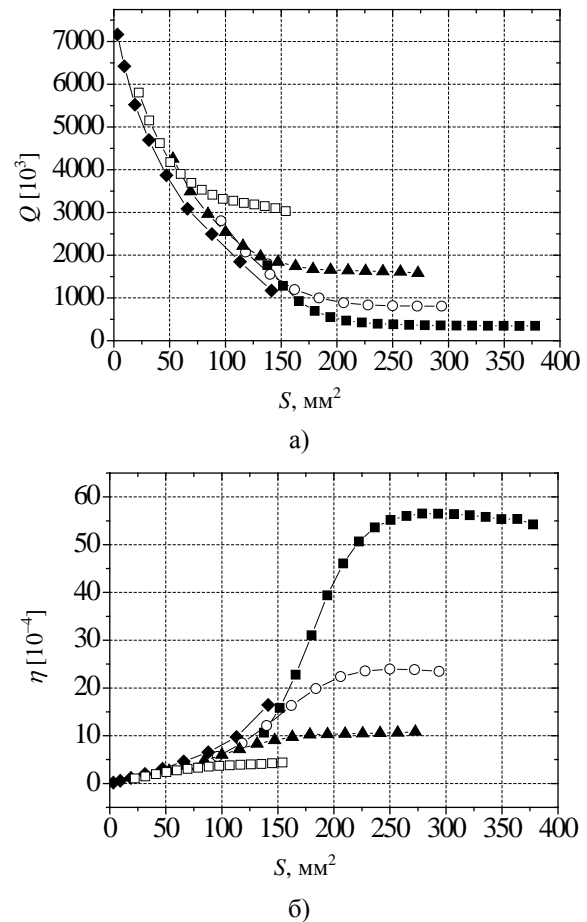


Рис. 8. Зависимость собственной добротности (а) и коэффициента заполнения (б) для прямоугольного резонатора с колебанием  $H_{101}$ :  $\blacklozenge - h = 0,5 \text{ мм}$ ;  $\square - R = 1,5 \text{ мм}$ ;  $\blacktriangle - R = 2,5 \text{ мм}$ ;  $\circ - R = 3,5 \text{ мм}$ ;  $\blacksquare - R = 4,5 \text{ мм}$

Теперь рассмотрим зависимость изменения коэффициента заполнения резонатора (рис. 8, б). Увеличение площади образца приводит к существенному увеличению коэффициента заполнения. Для образца в виде диска дальнейшее увеличение добротности резонатора ограничено физическими размерами диска, который не может быть больше размера стенки резонатора. Наибольший рост коэффициента заполнения наблюдается у образца в виде стержня, когда при увеличении площади от 150 до 200  $\text{мм}^2$  коэффициент заполнения увеличивается в 4 раза (рис. 8, б). Однако при дальнейшем увеличении размеров образца рост коэффициента заполнения прекращается и наблюдается некото-

рое уменьшение указанной величины. Это связано с тем, что в этом случае высота образца большая ( $h > 20$  мм) и часть образца находится вне минимума магнитного поля и, следовательно, поверхность образца используется менее эффективно. Надо заметить, что для образцов с  $R_{\text{цил}} < 3,5$  мм оптимум на графике коэффициента заполнения становится почти незаметным.

Таким образом, увеличивая радиус образца и его толщину, мы увеличиваем чувствительность до тех пор, пока увеличение коэффициента заполнения превалирует над уменьшением добротности (рис. 9). Отметим, что в данном случае зависимости параметра чувствительности для прямоугольного и цилиндрического резонаторов с образцами в виде стержня практически одинаковы (см. рис. 4). Для каждого из рассмотренных радиусов стержня существует вполне определенное значение его высоты, при которой дальнейшее увеличение этого размера не приводит к увеличению чувствительности, а для радиусов  $R_{\text{дис}} > 2,5$  мм наблюдается ее уменьшение.

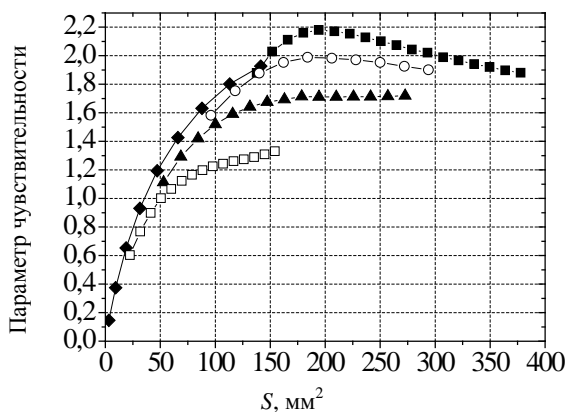


Рис. 9. Зависимость чувствительности для прямоугольного резонатора (колебание  $H_{101}$ ) с различной формой образцов от площади их поверхности:  $\blacklozenge$  –  $h = 0,5$  мм;  $\square$  –  $R = 1,5$  мм;  $\blacktriangle$  –  $R = 2,5$  мм;  $\circ$  –  $R = 3,5$  мм;  $\blacksquare$  –  $R = 4,5$  мм

#### 4. Экспериментальные исследования.

Сравнение характеристик представленных резонансных ячеек проводится в экспериментах с бесщелевым полумагнитным полупроводником  $\text{Hg}_{1-x}\text{SeCr}_x$  ( $x = 0,03$ ) на спектрометре ЭПР [12, 13].

Расчетные зависимости параметра чувствительности от расстояния между образцом и стенкой резонатора, приведенные на рис. 7, имеют характерный максимум при  $D = 1,5$  мм. В эксперименте получить зависимость, аналогичную приведенной выше, можно путем определения величины отношения сигнал-шум, которое пропорционально чувствительности спектрометра при прочих равных условиях, т. е. при сохранении величин, указанных в формуле (1). Так как в процессе проведения эксперимента регистрирующая часть спектрометра и условия проведения

измерений были неизменными, то чувствительность изменялась только за счет параметра  $\eta Q'$ .

Эксперимент проводился на 3-см спектрометре с прямоугольным резонатором, возбужденном на колебании  $H_{101}$ . Спектрометр построен по супергетеродинной схеме с синхронным детектированием сигнала на выходе [12]. Образцы имели форму шайбы толщиной 0,5 мм, радиусами  $R = 2,5$  мм и 3,75 мм и размещались на узкой стенке резонатора. Расстояние между стенкой резонатора и образцом  $D$  варьировалось в интервале от 0 до 6 мм с шагом 1 мм.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем:

- измерялось эффективное значение  $U_S$  сигнала на выходе синхронного детектора в максимуме линии ЭПР;
- измерялось эффективное значение шумов  $U_N$  на выходе синхронного детектора вне линии ЭПР;
- вычислялось значение  $U_S^2/U_N^2$ , пропорциональное чувствительности и являющееся искомым отношением сигнал-шум.

Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 10. На приведенных графиках наблюдается максимум при  $D = 1,5$  мм. При дальнейшем увеличении  $D$  монотонный спад отношения сигнал-шум хорошо согласуется с характером изменения величины пропорциональной чувствительности в расчетах. Отметим, что уменьшение радиуса образца приводит к сглаживанию зависимости отношения сигнал-шум от параметра  $D$ .

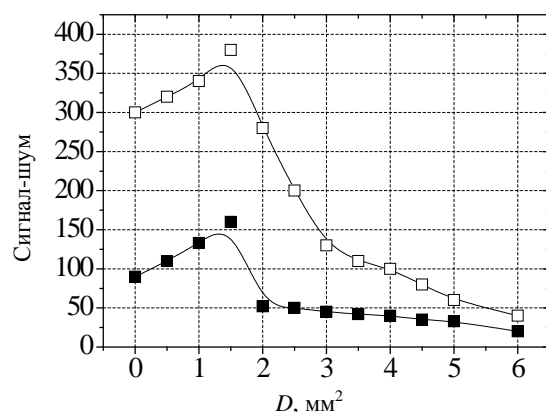


Рис. 10. Величина отношения сигнал-шум для прямоугольного резонатора (колебание  $H_{101}$ ) с различными образцами в зависимости от расстояния между стенкой резонатора и образцом:  $\square$  –  $R = 3,5$  мм;  $\blacklozenge$  –  $R = 2,5$  мм

**Выводы.** Таким образом, проанализированы результаты численного моделирования резонансных ячеек в виде цилиндрического (резонансное колебание  $H_{012}$ ) и прямоугольного (резонансное колебание  $H_{101}$ ) резонаторов с проводящими образцами и установлено, что:

– для цилиндрического резонатора с образцом в виде стержня ( $R_{ст} = 1,5$  мм) при его расположении вдоль оси  $OZ$  можно увеличить чувствительность в 10 раз при увеличении длины стержня от 0,5 до 17 мм;

– для цилиндрического резонатора с образцом в виде диска ( $h_{диск} = 0,5$  мм) при его расположении вдоль оси  $OZ$  увеличение радиуса диска целесообразно до  $R_{диск} = 6$  мм, так как дальнейшее его увеличение не приводит к увеличению чувствительности;

– для прямоугольного резонатора с образцами в виде диска толщиной меньше 0,5 мм и радиусом больше 2,5 мм оптимальным является положение образца в интервале расстояний  $0,5 \text{ мм} < D < 1,5 \text{ мм}$  от стенки прямоугольного резонатора;

– для прямоугольного резонатора при радиусах образцов  $R > 2,5$  мм увеличение их площади до значений, больших  $200 \text{ мм}^2$ , не приводит к увеличению чувствительности.

Экспериментальные результаты подтвердили увеличение чувствительности спектрометра при оптимальном расстоянии между стенкой прямоугольного резонатора и проводящим образцом.

#### Библиографический список

1. Пул. Ч. Техника ЭПР-спектроскопии / Ч. Пул; пер. с англ. под ред. Л. Д. Декабруна. – М.: Мир, 1970. – 357 с.
2. Резонансные ячейки радиоспектрометра миллиметрового диапазона, работающего при  $T > 4 \text{ К}$  / А. А. Вертий, Г. А. Звягина, И. В. Иванченко и др. // Приборы и техн. эксперимента. – 1988. – № 2. – С. 107–110.
3. Резонансная ячейка спектрометра ЭПР для исследования свойств полумангнитных полупроводников / А. А. Вертий, И. Я. Гудым, И. В. Иванченко и др. // Изв. вузов. Радиофизика. – 1995. – 38, № 10. – С. 1077–1082.
4. High-Frequency Module and Semiconductor Research at Low Temperature / A. A. Vertiy, I. V. Ivanchenko, N. A. Popenko et al. // Intern. J. of I&MM Waves. – 1991. – 12, N 10. – P. 1229–1238.
5. Vertiy A. A. Two-Frequency Quasi-Optical Radiospectrometer for Substance Investigations / A. A. Vertiy, I. V. Ivanchenko, N. A. Popenko // Intern. J. of I&MM Waves. – 1993. – 14, N 11. – P. 2339–2344.
6. Rosenbaum F. J. Dielectric cavity resonator for ESR experiments / F. J. Rosenbaum // Review of Scientific Instruments. – 1964. – 35, N 11. – P. 1550–1554.
7. D'Aiello R. V. Dielectric resonators for microwave applications / R. V. D'Aiello, H. J. Prager // Microwave Theory and Techniques. – 1964. – 12, N 5. – P. 549–550.
8. Longo I. An investigation of the travelling wave dielectric resonator for application to electron spin resonance experiments / I. Longo // Measurement Science and Technology. – 1991. – 2. – P. 1169–1173.
9. Дисконный диэлектрический резонатор для низкотемпературных магнитрезонансных исследований в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн / Т. В. Багмут, Р. В. Головащенко, В. Н. Деркач и др. // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2007. – 12, № 2. – С. 421–425.
10. A stripline resonator for ESR / B. Johansson, S. Haraldson, L. Pettersson et al. // Review of Scientific Instruments. – 1974. – 45, N 11. – P. 1445–1447.
11. Вертий А. А. Полосковая линия в виде ленты конечной ширины в открытом резонаторе / А. А. Вертий, Н. А. Попенко, В. П. Шестопалов // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1981. – № 1. – С. 53–56.
12. Карелин С. Установка для измерения параметров полумангнитных полупроводников методом электронного парамагнитного резонанса / С. Карелин // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2003. – 8, № 1 – С. 78–85.
13. Ivanchenko I. Automated ESR Spectrometer for Various Applications / I. Ivanchenko, S. Karelin, N. Popenko // Functional Materials. – 2004. – 11, N 1. – P. 125–130.

Рукопись поступила 25.10.2011

В. Bekirov, I. Ivanchenko,  
N. Popenko, R. Chernobrovkin

#### RESONANCE CELL OF EPR SPECTROMETER FOR INVESTIGATIONS OF SAMPLES WITH HIGH CONDUCTIVITY

The comparative analysis of electromagnetic characteristics of the resonance cells as the rectangular and cylindrical resonators of X-band EPR spectrometers from the point of view of providing their maximum sensitivity for investigations of samples with a high conductivity has been carried out in this paper. The findings have confirmed the sensitivity increase of spectrometer at the optimal distance between the rectangular resonator wall and the conductive sample under test.

**Key words:** resonance cell, EPR spectrum, sensitivity, sample.

Б. Е. Бекиров, І. В. Іванченко,  
Н. О. Попенко, Р. С. Чорнобровкін

#### РЕЗОНАНСНА КОМІРКА СПЕКТРОМЕТРА ЕПР ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗРАЗКІВ З ВИСОКОЮ ПРОВІДНІСТЮ

Проведено порівняльний аналіз електродинамічних характеристик резонансних комірок у вигляді прямокутного та циліндричного резонаторів для спектрометрів електронного парамагнітного резонансу 3-см діапазону з точки зору забезпечення максимальної чутливості при дослідженні зразків з високою провідністю. Отримані результати підтвердили збільшення чутливості спектрометра при оптимальній відстані між стінкою прямокутного резонатора та провідного зразка.

**Ключові слова:** резонансна комірка, спектр ЕПР, чутливість, зразок.