

ц 74

Д-332

ИТЭ, 1966, №3, с. 752-155 ✓  
14/III-65

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2210



Ю.Н. Денисов, В.В. Калиниченко

ШИРОКОДИАПАЗОННАЯ ПОГЛОЩАЮЩАЯ КАМЕРА  
ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЭПР  
В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

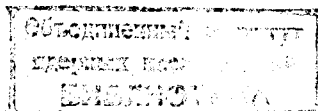
1965

2210

Ю.Н. Денисов, В.В. Калинин

ШИРОКОДИАПАЗОННАЯ ПОГЛОЩАЮЩАЯ КАМЕРА  
ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЭПР  
В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Направлено в ПТЭ



нр. 3433/2

Использование электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) для целей измерения и стабилизации магнитных полей привело к разработке конструкций поглощающих камер, отличных от применяемых в спектроскопии. Обычно в ЭПР - спектрометрах в качестве поглощающих камер используются объемные резонаторы того или иного типа<sup>/1,2/</sup>, работающие на фиксированной частоте или перестраиваемые в относительно узком диапазоне длин волн. В магнитометрах и стабилизаторах магнитного поля необходимо легко и быстро перекрывать широкий диапазон частот, и, следовательно, узкополосные резонансные поглощающие камеры неприемлемы.

В стабилизаторе магнитного поля, описанном в работе<sup>/3/</sup>, применяется широкодиапазонная поглощающая камера, выполненная в виде отрезка прямоугольного волновода, закороченного дроссельным поршнем (рис. 1). Основным достоинством этой камеры является крайняя простота ее конструкции. Как показано в работе<sup>/3/</sup>, относительное изменение мощности отраженной волны (блок-схема измерений показана на рис. 2), поступающей к детектору при резонансе, в случае применения такой камеры составляет

$$\frac{\Delta P_{\text{г}}}{P_{\text{г}}} = \frac{f_0 V_{\text{г}} \chi''}{7,5 a b} \sqrt{1 - (f_{\text{кр}} / f_0)^2}, \quad (1)$$

где  $f_0$  - резонансная частота,  $V_{\text{г}}$  - объем образца,  $\chi''$  - мнимая компонента динамической электронной восприимчивости образца,  $f_{\text{кр}} = c/2a$  - критическая частота волновода,  $c$  - скорость света,  $a$  и  $b$  - размеры соответственно широкой и узкой стенок волновода. Например, для экспериментально исследованной камеры сечением  $11 \times 5,5$  мм при объеме образца из дифенилпикрилгидразила, равном  $0,075 \text{ см}^3$ , в магнитном поле  $B_0 = 0,8$  тл относительное изменение мощности, поступающей к детектору,  $\Delta P_{\text{г}} / P_{\text{г}} = 1,10^{-2}$ . Отношение сигнал/шум при этом не хуже  $100 \div 300$ .

Недостатком камер такого типа является относительно большой объем образца, необходимый для получения достаточного отношения сигнал/шум. Большие линейные размеры образца приводят к существенному уменьшению амплитуды и значительному рас-

ширину резонансной линии ЭПР, если неоднородность измеряемого постоянного магнитного поля превышает  $5 \cdot 10^{-2}$  тл/ м. Сохранить ширину линии в неоднородном поле можно путем уменьшения объема образца, однако при этом происходит пропорциональное уменьшение сигнала и, следовательно, ухудшается отношение сигнал/шум.

Более эффективные широкополосные поглощающие камеры могут быть построены на основе направляющих систем, обладающих способностью концентрировать высокочастотное магнитное поле в большей степени, чем прямоугольный волновод. С этой точки зрения представляет интерес рассмотреть так называемый П-волновод, поперечное сечение которого показано на рис. 3. Рабочим типом колебаний для П-волновода является видоизмененный тип волны  $H_{10}$ . Для определения величины сигнала ЭПР при размещении образца в зазоре  $h'$  необходимо вычислить поперечную компоненту магнитного поля  $H_x(x, y, z)$ . К сожалению, для такой формы поперечного сечения волновода неизвестно решение волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + k^2 H = 0, \quad (2)$$

поэтому точно определить нужную компоненту высокочастотного магнитного поля не представляется возможным. Вычислим приближенное значение  $H_x$ . Если зазор  $h'$  достаточно мал, размер выступа  $0,5 \ell \leq \ell' < \ell - 2h'$  и глубина боковых полостей составляет  $(2 - 5) h'$ , можно упрощенно полагать, что поле П-волновода имеет три компоненты, отличные от нуля:  $H_x$ ,  $H_z$  и  $E_y$ . В этом случае допустимо считать, что поперечная компонента в.ч. магнитного поля  $H_x$  сосредоточена в зазоре  $h'$ , а продольная  $H_z$  - в боковых полостях. Воспользовавшись известным соотношением<sup>/4/</sup>

$$P = \frac{Z_{TE}}{2} \int_S H_x^2 dS, \quad (3)$$

можно определить  $H_x$ . В этом выражении  $P$  - мощность, проходящая через поперечное сечение волновода  $S$ ,  $Z_{TE}$  - характеристическое сопротивление волновода при волнах типа TE, равное в случае воздушного заполнения<sup>/5/</sup>

$$Z_{TE} = \frac{120 \pi}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}. \quad (4)$$

Критическую длину волны П-волновода можно определить по приближенной формуле<sup>/5/</sup>

$$\lambda_{кр} = \pi \sqrt{\frac{\ell h}{h'}} (\ell - \ell'). \quad (5)$$

Для волноводов с принятыми ранее ограничениями на соотношения размеров  $h$ ,  $h'$ ,  $\ell$ ,  $\ell'$  допустимо полагать, что поперечная составляющая магнитного поля однородна и равна  $H_{x \text{ эфф}}$ , величина которой определяется соотношением

$$H_{x \text{ эфф}}^2 \ell h' = \int_S H_x^2 dS. \quad (6)$$

Таким образом, для режима стоячих волн в волноводе, принимая во внимание (3) и (4), получим

$$H_{x \text{ эфф}}^2 = \frac{P}{15 \pi \ell h'} \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} \quad (7)$$

Мощность, поглощаемая веществом при резонансе, равна<sup>/6/</sup>

$$\Delta P = \pi f_0 \chi'' \int_{V_s} H^2 dV_s, \quad (8)$$

здесь:  $H = H_x(x, y, z)$ . Если размер образца по оси  $z$  меньше  $\lambda/4\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}$ , то относительное изменение мощности, поступающей к детектору при резонансе для П-камеры, составляет

$$\left( \frac{\Delta P_g}{P_g} \right)_П = \frac{f_0 V_s \chi''}{15 \ell h'} \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} \quad (9)$$

Следовательно, при одинаковых условиях наблюдения ЭПР для обоих типов поглощающих камер

$$\frac{(\Delta P_g / P_g)_П}{\Delta P_g / P_g} = \frac{ab}{2 \ell h'} \quad (10)$$

Это выражение позволяет произвести сравнительную оценку П-камеры и обычной прямоугольной по основному параметру - интенсивности регистрируемого сигнала ЭПР.

Соотношение (10) было проверено экспериментально. Поглощающая камера рассматриваемого типа, предназначенная для работы в диапазоне длин волн 0,75 - 1,8 см (16,8 - 40 Гц), представляла собой отрезок П-волновода с параметрами  $\ell = 6$  мм,  $\ell' = 3$  мм,  $h = 2,75$  мм,  $h' = 0,6$  мм и  $\lambda_{кр} = 2$  см. Расчет волновода можно произвести или по приближенной формуле (5) или по графикам, приведенным в работе<sup>/7/</sup>. Контрольная камера выполнена в виде закороченного с одного конца отрезка

прямоугольного волновода сечением  $11 \times 5,5$  мм. В обеих камерах образец из дифенилпикрилгидразида размещен непосредственно у короткозамкнутого конца, т.е. в пучности в.ч. магнитного поля. Для этих камер  $\frac{(\Delta P_g/P_g)_{\text{П}}}{\Delta P_g/P_g} = 9$  и, следовательно, интенсивность сигнала ЭПР при использовании П-камер должна быть в 9 раз больше, чем с контрольной камерой. Контрольная камера содержала образец объемом  $0,05 \text{ см}^3$  ( $0,5 \times 0,5 \times 0,2$  см), объем образца, помещенного в П-камеру, в 9 раз меньше  $0,005 \text{ см}^3$  ( $0,3 \times 0,08 \times 0,3$  см). Амплитуда импульса ЭПР при включении контрольной камеры составляет 3 мв, а с П-камерой 3,5 мв. Измерения производились при  $\lambda = 1,8$  см в однородном магнитном поле. Подводимая от клистронного генератора с.в.ч. мощность поддерживалась такой, чтобы ток детектора  $I_0 = 25$  мка (внутреннее сопротивление микроамперметра 700 ом). При уменьшении длины волны сигнал ЭПР увеличивается для обеих камер.

Таким образом, применение П-камеры позволяет на порядок уменьшить объем образца (в сравнении с камерой прямоугольного сечения) при сохранении величины наблюдаемого резонансного сигнала. Это позволяет использовать П-камеры в датчиках измерителей и стабилизаторов не только однородных, но и неоднородных магнитных полей, причем для увеличения допустимой неоднородности измеряемого поля камеру следует ориентировать таким образом, чтобы вдоль направления максимального градиента образец имел минимальные размеры. Например, П-камера с приведенными ранее параметрами и объемом образца из дифенилпикрилгидразида, равным  $0,0018 \text{ см}^3$  ( $0,3 \times 0,08 \times 0,1$  см), испытывалась в неоднородном магнитном поле при  $B_0 = 0,8$  тл и  $\partial B/\partial z = 50 \cdot 10^{-2}$  тл/м. По сравнению с однородным полем амплитуда резонансного сигнала уменьшалась незначительно (от 1,1 мв до 0,9 мв), а ширина линии увеличивалась на (10 - 20)%. Отношение сигнал/шум было не менее 50. Мощность в линии поддерживалась, как и прежде, такой, что ток детектора  $I_0 = 25$  мка. Соединение П-камеры с передающей волноводной линией прямоугольного сечения ( $11 \times 5,5$  мм) осуществляется при помощи плавного перехода длиной 140 мм.

На рис. 4 представлена П-камера в разобранном виде.

Авторы выражают благодарность И.А. Каплину и Х.Ф. Салахатдинову за изготовленные камеры и прочих волноводных элементов.

#### Л и т е р а т у р а

1. В. Горди, В. Смит, Р. Трамбаруло. Радиоспектроскопия. ГИТТЛ, М., 1956.
2. С.А. Альтшулер, Б.М. Козырев. Электронный парамагнитный резонанс. Физматгиз, М., 1961.
3. Ю.Н. Денисов, С.А. Ивашкевич, В.В. Калинин. Стабилизатор магнитного поля с широкодиапазонным датчиком на ЭПР. Препринт ОИЯИ, Р-1990, Дубна, 1965.

4. В.В. Никольский. Теория электромагнитного поля. ВШ, М., 1961.
5. И.В. Лебедев. Техника и приборы сверхвысоких частот, т. 1. Госэнергиздат, 1961.
6. Д. Инграм. Электронный парамагнитный резонанс в свободных радикалах. ИЛ, 1961.
7. А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов. Справочник по элементам волноводной техники. Госэнергиздат, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 июня 1965 г.

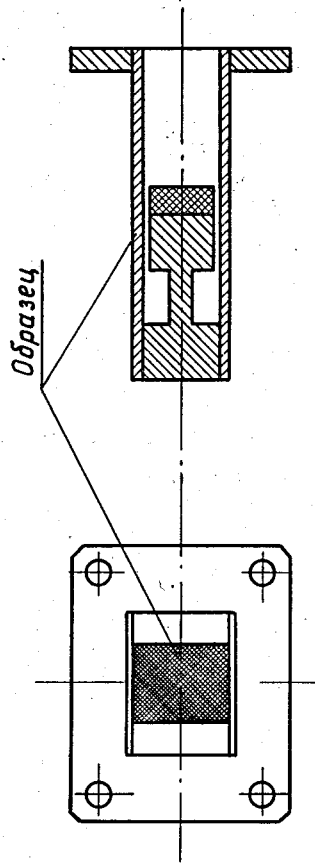


Рис. 1

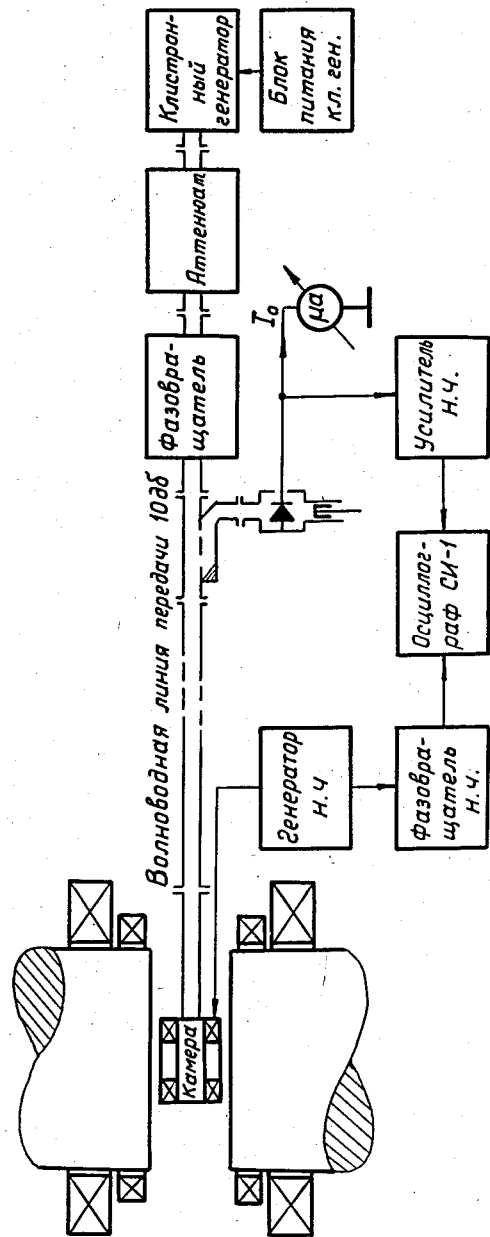


Рис. 2

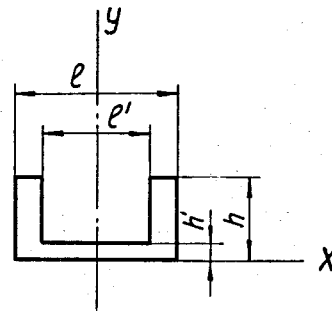


Рис. 3

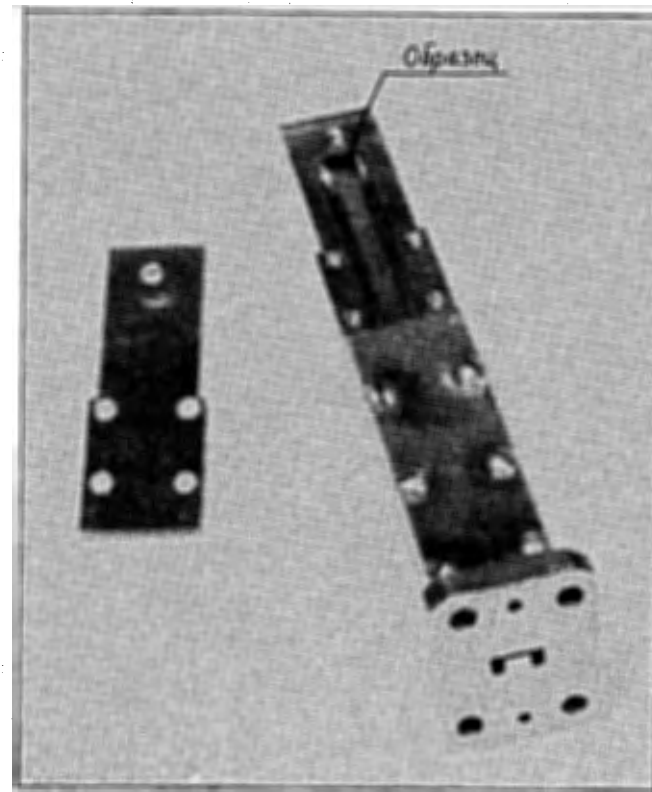


Рис. 4