

Ю.Н. Полухин, Л.К. Чернова, С.А. Маркелов, Н.М. Галдина,  
А.А. Рахаев

ВЫБОР РАБОЧЕГО РЕЖИМА И ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВКИ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ШИРИНЫ ЛИНИИ СПИН-ВОЛНОВОГО РЕЗОНАНСА ФЕРРИТОВ

Пороговой характеристикой, определяющей динамический диапазон линейных ферритовых СВЧ устройств и зависящей только от состава ферритового материала, является ширина линии спин-волнового резонанса  $2\Delta H_k$ . Для определения ее измеряется либо приращение температуры феррита [1], либо пороговый уровень СВЧ мощности [2], [5]. Измерять  $2\Delta H_k$  можно при поперечной (векторы СВЧ и постоянного магнитных полей ортогональны) и продольной накачке (векторы СВЧ и намагничивающего полей параллельны) [4]. Продольная накачка энергетически более выгодна, так как требует дорезонансных магнитных полей и соответствует случаю наименьшей пороговой СВЧ мощности, а резко выраженный излом в зависимости величины порогового поля  $h_n$  от намагничивающего поля  $H_0$  [5] значительно уменьшает субъективные ошибки определения  $h_n$  и  $2\Delta H_k$ .

В установке для измерения  $2\Delta H_k$  при продольной накачке пороговому уровню СВЧ мощности соответствует характерное искажение ("скол") вершины прямоугольного СВЧ импульса [2], [3], и величина  $h_n$  связана с  $2\Delta H_k$  простым соотношением:

$$h_n = \frac{\omega}{\omega_m} 2\Delta H_k = \frac{\omega}{\mu_0 \gamma} \sigma, \quad (1)$$

где  $\omega_m = \mu_0 \gamma M_0$ ;  $\gamma = 1,76 \cdot 10^{11}$  к/кг;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$\sigma = \frac{2\Delta H_k}{M_0}$  - величина, определяемая параметрами феррита и в значительной степени влияющая на выбор режима измерительной установки.

Для существующих в настоящее время ферритов параметр  $\sigma$  изменяется в широких пределах и может достигать 1,5. При этом для измерения  $2\Delta H_k$  необходимы очень высокие значения СВЧ мощности (порядка 30 МВт).

Задача значительно упрощается, если в качестве измерительной секции применять высокочастотный резонатор и импульсную накачку с высокой скважностью  $q$ . В этом случае требуемая мощность в импульсе  $P''$  обеспечивается при средней мощности

$$P = \frac{P''}{q}. \quad (2)$$

Амплитуда поля в области расположения ферритового образца мо-

жет быть выражена через энергию, запасенную в резонаторе:

$$W_{30n} = \frac{\mu_0}{2} \int_V |h(\vec{r})|^2 dV = \frac{1}{\omega_p} \left( \frac{h_m}{k} \right)^2, \quad (3)$$

которая связана с нагруженной добротностью  $Q_H$  и мощностью потерь резонатора ( в импульсе)  $P_n''$  соотношением

$$Q_H = \omega_p \frac{W_{30n}}{P_n''}. \quad (4)$$

Здесь  $k$  - коэффициент, зависящий от конструкции и размеров резонатора, типа колебаний и координат точки, в которой рассчитывается  $h_m$ . При расположении образца в центре прямоугольного резонатора с поперечными размерами  $a, b$ , работающего на колебании

$$H_{102}, \quad k = \left\{ \frac{1}{30\pi^2 a b} \left[ \left( 1 - \frac{\lambda_p}{2a} \right)^2 \right] \right\}^{3/2}$$

При расположении образца в центре цилиндрического резонатора радиусом  $R$ , работающего на колебании  $H_{011}$ ,

$$k = \left\{ \frac{0,765}{\pi^3} \frac{\lambda_p}{R^4} \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_p}{1,64R} \right)^2} \right\}^{1/2}.$$

Соотношения (2) - (4) позволяют представить  $h_m$  в виде

$$h_m = k \sqrt{Q_H P_n''}, \quad (5)$$

где  $P_n$  - среднее значение мощности потерь резонатора, которое может быть определено через среднюю мощность падающей волны  $P_{пад}$  и резонансное значение коэффициента отражения резонатора  $\Gamma_p$ :

$$P_n = (1 - |\Gamma_p|^2) P_{пад}$$

Величину  $|\Gamma_p|$  можно определить по результатам измерения ослабления отраженного сигнала при резонансе  $L_p$ :

$$L_p = -10 \lg |\Gamma_p|^2,$$

а нагруженную добротность - с помощью соотношения

$$Q_H = \frac{f_p}{2\Delta f_{0,5}}, \quad (6)$$

где  $2\Delta f_{0,5}$  замеряется по форме резонансной кривой отраженного сигнала на уровне

$$L_{0,5} = -10 \lg \frac{1 + |\Gamma_p|^2}{2}.$$

Функциональная схема установки (рис. I) включает магнетронный генератор СВЧ сигнала, аттенуатор для регулирования уровня мощности в измерительном резонаторе, измерительную резонаторную секцию и осциллограф для визуального контроля появления "скола" импульса. Измеритель входной мощности включается непосредственно после генератора СВЧ через направленный ответвитель с большим (порядка 30 дБ) переходным ослаблением.

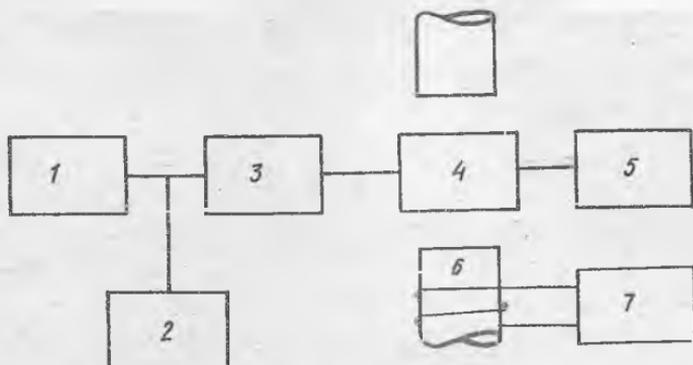


Рис. I. Функциональная схема установки:

1 - Генератор СВЧ; 2 - измеритель мощности; 3 - аттенуатор; 4 - измерительная секция; 5 - индикатор; 6 - электромагнит; 7 - источник тока

Основным условием для выбора рабочего режима установки является обеспечение в резонаторе порогового значения амплитуды магнитного поля:

$$h_m > h_n \quad (7)$$

при возможно меньшей мощности падающей волны  $P_{пад}$ , которая при критической связи ( $\Gamma_p = 0$ ) равна мощности потерь резонатора. При известной мощности в СВЧ тракте это условие позволяет выбрать предельные значения скважности  $q$  и нагруженной добротности измерительной секции  $Q_N$ . Подставляя (5) в (7), получаем

$$Q_N \geq Q_{N \min} = \frac{h_n^2}{k^2 q P_{пад}}$$

Зависимость минимально допустимого значения добротности  $Q_{N \min}$  от  $\tau F_n = \frac{1}{q}$  ( $F_n$  - частота повторения,  $\tau$  - длительность импульса) представлена на рис. 2а прямой I. При увеличении мощности в тракте прямая I смещается к оси абсцисс, увеличивая область допустимых значений  $Q_N$  и  $\tau F_n$ .

Вторым условием, влияющим на выбор  $Q_N$  и  $\tau$ , является отсутствие искажений формы импульса, отраженного от резонатора, при допустимых значениях СВЧ поля:

$$2\Delta f_{0,5} \geq 2\Delta f_c, \quad (8)$$

где  $2\Delta f_c$  - ширина спектра СВЧ сигнала, которую для импульсов, близких к прямоугольным, можно записать:  $2\Delta f_c = 2/\tau = 2F_n q$ .

Подставляя полученное выражение и равенство (6) в (8), получаем

$$Q_H \leq Q_{H, \max} = \frac{f_p}{2F_H q} \quad (9)$$

Зависимость максимально допустимой добротности  $Q_{H, \max}$  от  $\tau F_H$  представлена на рис. 2а прямой 2. Условие (9) выполняется в области, расположенной ниже этой прямой.

Наряду с отмеченными условиями, при выборе скважности следует исключить возможность маскировки нелинейных эффектов тепловыми. Тепловой режим образца определяется средней, поглощаемой ферритом мощностью  $P_\Phi = \frac{P_\Phi}{q}$ . Для обеспечения нормального теплового режима феррита должно выполняться условие:

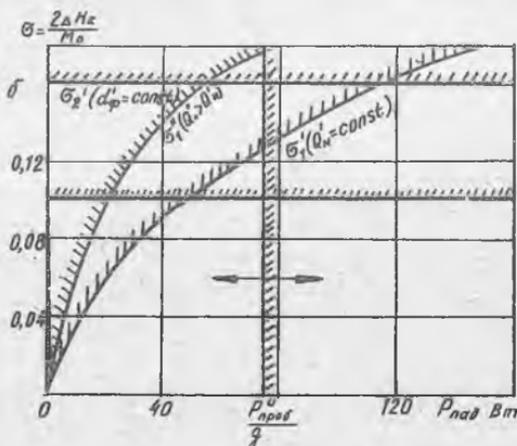
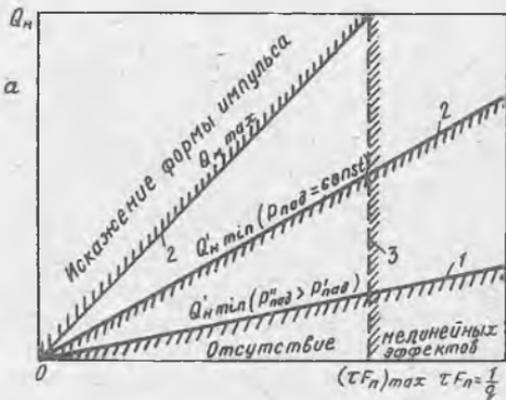


Рис. 2. Выбор рабочего режима установки по  $Q_H$ ,  $q$  и  $\sigma$

$$P_\Phi = \frac{1}{2q} \omega \mu_0 x'' h_m^2 V_\Phi \leq P_{\text{пред}} \quad (10)$$

где  $x''$  - мнимая часть магнитной восприимчивости, которую вне ферромагнитного резонанса можно считать равной 0,01 [5];  $V_\Phi$  - объем ферритового образца;  $P_{\text{пред}}$  - предельная поглощаемая мощность, которую феррит выдерживает без перегрева и которую для образца размером порядка 1 мм можно считать равной 1Вт [5]. При  $h_m = h_n$

условие (10) можно записать в виде

$$\tau F_n < (\tau F_n)_{max} = \frac{2P_{пред}}{\mu_0 \chi^n \omega V_{\varphi} h_n^2}$$

Максимально допустимое значение  $\tau F_n$  отмечено на рис. 2а прямой 3. Таким образом, перечисленные условия ограничивают допустимые значения  $Q_n$  и  $\tau F_n$  в замкнутой области, образованной прямыми 1, 2, 3 (рис. 2а).

При известных скважности, добротности и объеме ферритового образца условия (7) и (10) позволяют оценить диапазон допустимых значений параметра  $\sigma$  исследуемых образцов. Из равенства (7) с учетом (1) и (5) следует условие:

$$\sigma < \sigma_1 = \frac{\mu_0 \chi}{\omega} k \sqrt{Q_n q P_{пред}}$$

определяющее диапазон значений  $\sigma$ , в котором при известных  $Q_n, q, P_{пред}$  возможно достижение порога (область, ограниченная кривой 1, рис. 2б).

Из (10) и (1) получаем условие

$$\sigma < \sigma_2 = \mu_0 \chi \sqrt{\frac{2q P_{пред}}{\mu_0 \chi^n V_{\varphi} \omega^3}}$$

определяющее диапазон значений  $\sigma$ , в котором при заданных  $q$  и  $V_{\varphi}$  отсутствует перегрев образца (область, ограниченная кривой 2, рис. 2б). Прямая 3 (рис. 2б), параллельная оси ординат, соответствует среднему значению мощности электрического пробоя и ограничивает выбор источника СВЧ мощности по величине  $P_{пред}$ . Для элементов волноводного тракта величина мощности пробоя зависит от конструкции устройств, что отмечено на рис. 2б двунаправленной стрелкой. Масштаб рисунка 1б соответствует следующим данным:  $q = 1,22 \cdot 10^3$ ;  $P_{пред} = 1$  Вт;  $k = 2,5$ ;  $\chi^n = 0,01$ ;  $f = 9,43$  ГГц;  $d_{\varphi} = 1,5$  мм;  $Q_n^i = 2 \cdot 10^3$ ;  $Q_n^a = 4 \cdot 10^3$ .

При использовании импульсной накачки следует учитывать зависимость порогового поля от длительности импульса. Известно [6], что при укорочении импульсов измеренное значение порогового поля растет по сравнению с его значением в непрерывном режиме. Для ферритов с  $2 \Delta H_k > 3\beta$  это увеличение становится заметным при длительности импульсов меньше 2 мкс. Чтобы исключить этот эффект, при измерении  $2 \Delta H_k$  следует использовать импульсы не короче 2 мкс, но не более 10 - 15 мкс (для обеспечения достаточно высокой скважности).

Амплитуду поля в резонаторе можно регулировать, изменяя коэффициент связи резонатора с СВЧ трактом  $\beta$ , определяемый как отноше-

ние собственной добротности резонатора  $Q_0$  к добротности связи  $Q_{св}$  :

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{св}}$$

и связанный с нагруженной добротностью соотношением

$$\frac{Q_H}{Q_0} = \frac{1}{1 + \beta} \quad (II)$$

Коэффициент отражения резонатора на резонансной частоте  $\Gamma_p$  выражается через коэффициент связи следующим образом:

$$\Gamma_p = \frac{\beta - 1}{\beta + 1}; \quad |\Gamma_p| = \frac{\beta - 1}{\beta + 1},$$

где верхний знак " - " соответствует  $\beta < \beta_{кр}$  ; нижний знак " + " -  $\beta > \beta_{кр}$  ;  $\beta_{кр} = 1$  - критическое значение коэффициента связи, при котором  $\Gamma_p = 0$ .

Полная мощность потерь в резонаторе на резонансной частоте может быть определена из энергетического соотношения :

$$\frac{P_n}{P_{над}} = 1 - |\Gamma_p|^2 = \frac{4\beta}{(1 + \beta)^2} \quad (I2)$$

Зависимость  $P_n/P_{над}$  от коэффициента связи приведена на рис. За (кривая 1). Используя равенства (5), (II) и (I2), амплитуду поля в резонаторе можно представить в виде

$$h_m = k \sqrt{q Q_0 P_{над}} \sqrt{\frac{4\beta}{(1 + \beta)^2}} \quad (I3)$$

Максимальное значение  $h_m$  соответствует оптимальной связи резонатора с линией передачи  $\beta_{opt} = 0,5$  (рис. За, кривая 2). Из формулы (I3) получим

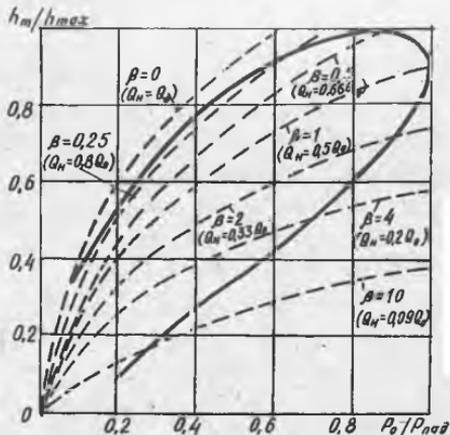
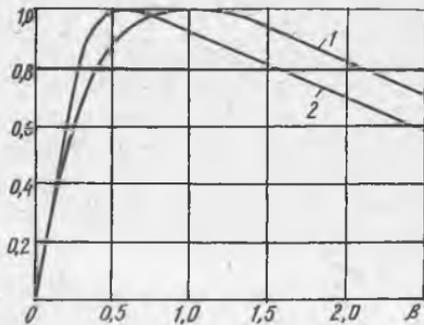


Рис.3. Выбор параметров измерительной секции

$$\frac{h_m}{h_{max}} = 1,3 \sqrt{\frac{Q_n}{Q_0} \frac{P_n}{P_{пад}}} \quad (14)$$

Из графиков, приведенных на рис. За, видно, что амплитуда поля мало критична к величине  $\beta$  и незначительно изменяется при изменении  $\beta$  от 0,25 до 1,5. Наиболее благоприятный режим работы установки соответствует докритической связи в области  $\beta = 0,25 - 0,5$ , так как в этом случае поле, близкое к максимальному, обеспечивается при мощности, меньшей максимального значения.

На рис. Зб представлены зависимости  $h_m/h_{max}$  от  $P_n/P_{пад}$  для ряда значений  $\beta$ . При фиксировании связи  $\beta = const$  с изменением  $P_n/P_{пад}$  рабочая точка перемещается по одной из штриховых кривых. При изменении связи происходит одновременное изменение нагруженной добротности  $Q_n$  и мощности потерь в резонаторе  $P_n$ , в результате чего рабочая точка перемещается с одной характеристики  $\beta = const$  на другую по кривой, отмеченной сплошной линией, которая может быть названа нагрузочной характеристикой резонатора. Верхняя ветвь ее соответствует  $\beta < \beta_{кр}$ , нижняя —  $\beta > \beta_{кр}$ .

На основании изложенной методики была разработана измерительная установка, позволяющая при продольной накачке измерять пороговые характеристики ферритовых образцов с шириной линии спин-волнового резонанса  $2\Delta H_k$  от 0 до 10 Э. Погрешность измерения ширины линии спин-волнового резонанса по ориентировочным оценкам не превышает  $\pm 10\%$ .

### Л и т е р а т у р а

1. С и г а л М.А. Прямой метод определения запороговой восприимчивости при возбуждении спиновых волн в ферритах. "Приборы и техника эксперимента", 1973, № 1, с.209.
2. Ш л е м а н Е., Г р и н Дж., М и л а н о У. Исследование ферромагнитного резонанса при высоком уровне мощности.—В сб.: Нелинейные свойства ферритов в полях СВЧ. Под ред. А.Л. Микаэляна. М., "Иностранная литература", 1963.
3. П е т р а к о в с к и й Г.А., Р е д ь к и н Г.А. Параметрическое возбуждение спиновых волн в ферритах на СВЧ. Известия вузов СССР, "Физика", 1962, № 6.
4. С у л Г. Теория ФМР при больших уровнях ВЧ мощности.— В сб.: Ферриты в нелинейных СВЧ устройствах. Под ред. А.Г. Гуревича. М., "Иностранная литература", 1961, с.163.
5. М о н о с о в Я.А. Нелинейный ферромагнитный резонанс. М., "Наука", 1971.

6. П е т р а к о в с к и й Г.А. О зависимости пороговой мощности ферритовых устройств от длительности ВЧ импульса. "Радиотехника и электроника"; 1970. №4, с.764.

Ю.Н.Полухин, Н.М.Галдина, С.А.Маркелов, Л.К.Чернова, А.А.Рахаев

СИСТЕМА ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ  
ФЕРРИТОВЫХ ПРЕСЕЛЕКТОРОВ СВЧ ПРИЕМНИКОВ

Параметрами ферритовых фильтров являются частота настройки фильтра  $\omega_{\varphi}$ , минимальные потери в полосе пропускания  $L$ , полосы пропускания по уровню 3 и 30 дБ ( $B_3$  и  $B_{30}$ ), КСВН в полосе пропускания. Для двухрезонаторного ферритового фильтра петлевого типа при критической связи между резонаторами модуль коэффициента передачи определяется выражением [1]

$$|K(\omega)|^2 = \frac{4\beta^2(1+\beta)^2}{4(1+\beta)^2 + a^2}$$

где  $a = \frac{2(\omega - \omega_0)Q_0}{\omega_0}$  - обобщенная расстройка ;  
 $\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0$  - частота ферромагнитного резонанса;  
 $\gamma$  - гиромагнитное отношение ;  $Q_0$  - собственная добротность ферритового резонатора ;  $\beta = \frac{Q_0}{Q_{ca}} = Q_0 \frac{\pi \mu_0 \gamma}{6 Z_0} \frac{\omega}{\omega_0} \frac{z_{\varphi}^2}{Z_0} M_0$  - коэффициент связи ферритового резонатора с линией передачи, где  $z_{\varphi}$  и  $Z_0$  - соответственно радиус ферритовой сферы и витка связи ;  $Z_0$  - волновое сопротивление линии ;  $M_0$  - намагниченность насыщения.

Максимальным значением коэффициента передачи (при  $a = 0$ )  $|K_0|^2 = \beta^2 / (1 + \beta)^2$  определяются минимальные потери в полосе пропускания. Полосы пропускания по уровню 3 и 30 дБ, КСВН в полосе пропускания и частота настройки фильтра определяются выражениями:

$$B_3 = \sqrt{2} (1 + \beta) \frac{\omega_0}{Q_0} ; \quad B_{30} = \frac{11}{\sqrt{2}} (1 + \beta) \frac{\omega_0}{Q_0} ;$$

$$КСВН = \frac{2 + \beta}{\beta} ; \quad \omega_{\varphi} = \omega_0 (1 + \delta),$$

где  $\delta$  - параметр потерь

Из приведенных соотношений видно, что параметры фильтра существенно зависят от температуры - с изменением температуры изменяются геомет-