

© А.А. ВЕРТИЙ, С.П. ГАВРИЛОВ, С.И. ТАРАПОВ,
академик АН Украины В.П. ШЕСТОПАЛОВ

БЕЗИНВЕРСИОННОЕ УСИЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА В ПАССИВНОМ НЕЛИНЕЙНОМ КВАЗИОПТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

1. Быстрый прогресс нелинейной оптики сделал реальным наблюдение и использование оптической бистабильности в пассивных нелинейных резонансных электродинамических структурах, например, в интерферометре Фабри–Перо, частично или полностью заполненном средой с нелинейным поглощением или преломлением.

Представляет интерес изучение нелинейных квазиоптических резонаторов на миллиметровых волнах, внутри которых находится парамагнитное вещество. Квазиоптические резонаторы с парамагнетиком, работающие в линейном режиме, изучены достаточно полно и широко используются в качестве измерительных ячеек электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в радиоспектрометрах [1].

ЭПР-ячейка в этом случае работает в режиме, когда отсутствует насыщение СВЧ-полем рабочей среды. При этом нелинейные свойства ячейки, например зависимость коэффициента передачи от интенсивности падающей волны, не наблюдаются.

Нелинейные свойства квазиоптического резонатора с парамагнитной средой в условиях ЭПР проявляются в том случае, когда СВЧ-поле имеет достаточную величину, чтобы насытить рабочую среду. Целью данной работы является изучение в условиях насыщения линии ЭПР нелинейного пропускания и бистабильности квазиоптического резонатора Фабри–Перо со слоем парамагнетика и наблюдение безинверсионного усиления (управления) гармонических сигналов такой электродинамической структурой.

Следует заметить, что нелинейное пропускание и бистабильность плоскостоего интерферометра Фабри–Перо, заполненного насыщающейся парамагнитной средой, изучались в работах [2, 3]. С помощью расчета в этих работах показана возможность гистерезиса коэффициента передачи такого интерферометра.

В настоящей работе приведены результаты изучения нелинейных эффектов, наблюдаемых в условиях ЭПР, в случае использования в качестве резонансной ячейки полусимметричного квазиоптического резонатора типа Фабри–Перо со слоем рубина. Эксперименты проведены на низкотемпературном радиофизическом комплексе (радиоспектрометре) "Буран" [1] при температурах $T' \approx 4,2-0,8$ К и частоте $\nu \approx 75$ ГГц.

2. Схема исследуемой ячейки показана на рис. 1, где R, R' – отражатели резонатора; ρ, θ и ρ', θ' – соответственно комплексные коэффициенты отражения, пропускания сферического и плоского зеркал изнутри резонатора; a_1, a_2 и b_1 – комплексные амплитуды падающей, прошедшей и отраженной волн. Исследуем стационарный режим работы резонатора, возбуждаемого падающей электромагнитной волной с частотой $\omega = 2\pi\nu$, в случае, когда в нем расположен слой парамагнетика (рубина) толщиной l_2 . Парамагнитная среда находится в условиях магнитного

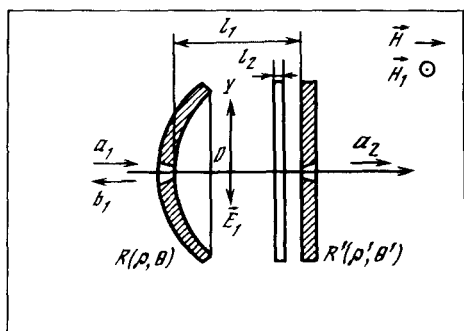


Рис. 1. Схема исследуемой ячейки

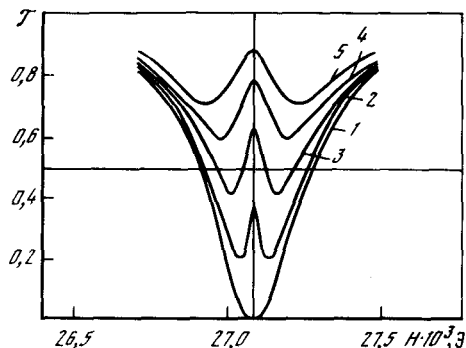


Рис. 2. Зависимости коэффициента передачи \mathcal{T} резонатора от величины статического магнитного поля H при фиксированных значениях квадрата амплитуды магнитной компоненты $|H_1|^2$ СВЧ-поля в резонаторе

резонанса, причем статическое поле \mathbf{H} приложено вдоль оси резонатора (ось z). Все поля рассматриваются вблизи зеркал R и R' , и, поскольку волны в резонаторе поляризованы, допустим, что магнитная \mathbf{H}_1 и электрическая \mathbf{E}_1 компоненты СВЧ-поля перпендикулярны \mathbf{H} . Компонента \mathbf{H}_1 индуцирует в парамагнитном слое дипольные магнитные переходы [4], в результате которых увеличивается (по сравнению со случаем $\mathbf{H}_1 = 0$) населенность верхнего состояния и поглощается энергия СВЧ-поля. Рассмотрим прохождение волны через объем, ограниченный зеркалами R, R' , полагая, что на зеркале падающая волна характеризуется распределениями $a_1 \mathcal{E}_{mn}(x, y), a_1 \mathcal{H}_{mn}(x, y)$, где $\mathcal{E}_{mn}(x, y), \mathcal{H}_{mn}(x, y)$ — распределения в поперечном сечении соответственно электрической и магнитной компоненты одной из собственных мод пустого резонатора. Предположим, что резонатор заполнен средой с усредненной восприимчивостью $\chi_{mnq} = \eta \chi$, где χ — комплексная магнитная восприимчивость парамагнетика; η — коэффициент заполнения, равный отношению объема парамагнетика к объему резонатора. Восприимчивость $\chi = \chi' - i\chi''$ в рассматриваемом случае определена из решений уравнений Блоха [4, 5]. Согласно [4] коэффициент передачи слоя l_1 для магнитной компоненты поля $a_1 \mathcal{H}_{mn}(x, y)$ с учетом дифракции на отражателях резонатора и условий Леонтовича [6] запишется в виде

$$(1) \quad t(\omega) = \pm \frac{d_{mn}}{r} \exp \left\{ -i \left[\frac{R_1 \alpha}{c} (\omega - \omega_{mnq} + 2\pi\eta\omega\chi) - \varphi \right] \right\},$$

где d_{mn} — вещественное число, обусловленное дифракцией; c — скорость электромагнитного возмущения; ω_{mnq} — частота одной из мод резонатора ($H = 0$); $\alpha = \sqrt{1 + 4\pi\chi_{\text{г}} \eta}$; $\chi_{\text{г}}$ — электрическая восприимчивость;

$$r = \sqrt{(1 + 2\pi\eta\chi')^2 + (2\pi\eta\chi'')^2}; \quad \varphi = \arctg[2\pi\eta\chi''/(1 + 2\pi\eta\chi')].$$

Тогда энергетический коэффициент передачи резонатора $\mathcal{F} \equiv |t(\omega)|^2$ при условии, что ρ, ρ' вещественны, $\rho^2 + |\theta|^2 = \rho'^2 + |\theta'|^2 = 1$ (т.е. на зеркалах не рассеивается мощность и их можно считать бесконечно тонкими), $\rho, \rho', \theta, \theta'$ не зависят от частоты ω , и упрощающем предположении $\rho = \rho'$ и $\theta = \theta'$ запишем в виде

$$(2) \quad \mathcal{F} = T^2 DB / \{1 + R^2 D^2 B^2 - 2RDB \cos 2[(\psi + A)l_1 \alpha / c - \varphi]\},$$

где T, R — соответственно энергетические коэффициенты передачи и отражения зер-

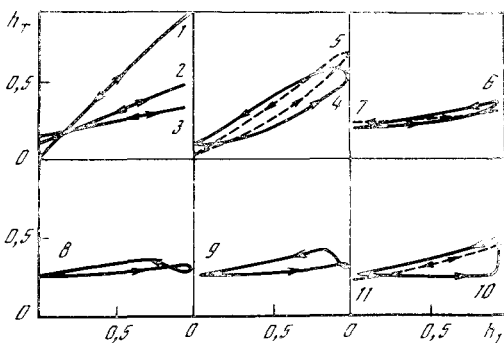
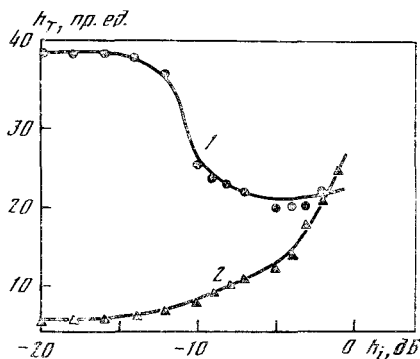


Рис. 3. Гистерезис коэффициента передачи \mathcal{T} нелинейного резонатора при различных значениях статического поля H

Рис. 4. Зависимости амплитуды информационного сигнала на выходе резонатора от амплитуды насыщающего сигнала на его входе



кал резонатора;

$$B = \exp(-4\pi l_1 \omega \chi'' \eta \alpha(\epsilon)), \quad D = (d_{mn}/r)^2, \quad A = 2\pi \eta \omega \chi', \quad \psi = \omega - \omega_{mnq}.$$

Для парамагнетика $|\chi| \ll 1$. Тогда (2) принимает стандартный вид [7] и описывает бистабильное поведение резонатора, заполненного нелинейным поглотителем.

3. Зависимости от $H \equiv |H|$ коэффициента передачи \mathcal{T} резонатора, рассчитанные по (2) при нескольких фиксированных значениях квадрата амплитуды магнитной компоненты $|H_1|^2$ СВЧ-поля в резонаторе, представлены на рис. 2. При расчете принято, что $\psi = 0$; рабочая частота генератора $\nu = 75,076345$ ГГц; $\chi_0 = 4,8 \cdot 10^{-5}$ – равновесная магнитная восприимчивость парамагнетика ($H_1 = 0$); $\gamma = 1,7414 \cdot 10^7$ Гц/Э – гиромангнитное отношение; $T' = 4,2$ К – температура парамагнетика; $T_1 = 6 \cdot 10^{-2}$ и $T_2 = 6 \cdot 10^{-9}$ с – соответственно время продольной и поперечной релаксации; $\eta = 6 \cdot 10^{-3}$; $\alpha = 1,01867$; $T = 1 \cdot 10^{-2}$; $R = 0,99$; $l_1 = 11,13\pi c/\alpha\omega$; $l_2 = 0,68\pi c/\sqrt{\epsilon}\omega$, где $\epsilon \approx 7,3$ – диэлектрическая проницаемость рубина. Кривые 1–5 соответствуют следующим значениям $|H_1|^2$, Э²: 1 – 10^{-14} ; 2 – 10^{-3} ; 3 – $2,5 \cdot 10^{-3}$; 4 – $5 \cdot 10^{-3}$; 5 – 10^{-2} . Расчет \mathcal{T} по (2) хорошо согласуется с этими кривыми при соответствующем наборе параметров резонатора. Из рис. 2 следует, что насыщение парамагнитной среды приводит к тому, что на зависимости $\mathcal{T}(H)$ появляются два минимума. Разность значений ΔH статического поля H , при которых наблюдаются минимумы $\mathcal{T}(H)$, а также экстремальные значения $\mathcal{T}(H)$ растут с увеличением поля в резонаторе.

Такое поведение характеристик резонатора позволяет сделать вывод, что изучаемая электродинамическая структура должна обладать гистерезисными свойствами [7]. Эти свойства исследуемого резонатора были обнаружены нами экспериментально. На рис. 3 представлены наблюдаемые гистерезисные петли при различных значениях статического поля H в линии ЭПР, кривые 1–11 ($T' \approx 4,2$ К; переход $(|1/2\rangle \leftrightarrow |-1/2\rangle)$). Кривая 5 соответствует центру линии, кривые 4–10 находятся в интервале ΔH между минимумами $\mathcal{T}(H)$ (рис. 2). Значения h_i , h_T – нормированные интенсивности сигналов соответственно на входе и выходе резонатора. Для наблюдения гистерезисных циклов использовался низкочастотный сигнал треугольной формы, формируемый с помощью p - i - n -диода.

4. Изученные нелинейные эффекты дают основание предположить, что исследуемая структура может быть успешно использована, например, в качестве биста-

близатора ячейки памяти, квазиоптического дискриминатора, квазиоптического ограничителя, дифференциального усилителя [7] (квазиоптического транзистора), в котором усиление переменного сигнала происходит без инверсии населенности. Такой усилитель, согласно [7], представляет собой резонатор Фабри–Перо, содержащий нелинейный поглотитель. По мере насыщения поглотителя наблюдается рост дифференциального усиления.

В данной работе основное внимание уделено экспериментальному исследованию наиболее интересного, на наш взгляд, из упомянутых свойств – дифференциального усиления информационного сигнала квазиоптическим нелинейным резонатором.

При этом в нелинейный резонатор, находящийся при температуре $T' \approx 0,82 \text{ К}$, было введено два разных СВЧ-сигнала с одинаковой частотой ω . Первый сильный (немодулированный) обеспечивал насыщение парамагнитной среды в условиях ЭПР. Второй (слабый, модулированный по амплитуде $f \approx 10^3 \text{ Гц}$) играл роль усиливаемого сигнала (информационного).

Основные результаты первых экспериментов приведены на рис. 4, где по оси абсцисс отложена величина, пропорциональная амплитуде насыщающего сигнала на входе резонатора h_i , а по оси ординат – амплитуде информационного сигнала на выходе резонатора h_T . Кривая 2 описывает зависимость $h_T = f(h_i)$ в условиях ЭПР, кривая 1 – вне условий ЭПР. Видно, что амплитуда информационного сигнала (кривая 2) увеличивается по мере насыщения рабочей среды. Максимальный коэффициент усиления составляет $G \approx 2,5$. Уменьшение амплитуды в отсутствие ЭПР (кривая 1) объясняется увеличением рассеянного поля из квазиоптического резонатора из-за теплового разогрева жидкого гелия, заполняющего резонатор. Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что несмотря на такие дополнительные потери коэффициент усиления растет по мере роста амплитуды насыщающего сигнала.

5. Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о том, что квазиоптический нелинейный резонатор с насыщающимся парамагнитным заполнением, являясь бистабильной структурой, обнаруживает свойство дифференциального усиления информационных сигналов в отсутствие инверсии населенностей в рабочей среде.

Коэффициент усиления может быть существенно увеличен за счет уменьшения поглощения в рабочей среде, при использовании механизма дисперсионной бистабильности, обеспечения адекватной технологии изготовления нелинейной структуры.

Результаты проведенных исследований представляют интерес при создании нелинейных устройств (усилителей, ограничителей и т.д.), работающих при комнатных температурах.

Институт радиоп физики и электроники
Академии наук Украины, Харьков

Поступило
8 I 1992

ЛИТЕРАТУРА

1. Vertiy A.A., Ivanchenko I.V., Tarapov S.I., Shestopalov V.P. – Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 1989, vol. 10, № 3, p. 395–405.
2. Вертий А.А., Гаспулов С.П., Таранов С.И., Шестопалов В.П. – ДАН, 1990, т. 313, № 4, с. 849–853.
3. Verty A.A., Gavrilov S.P., Chumachenko S.G. – Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 1991, vol. 12, № 4.
4. Бертен Ф. Основы квантовой электроники. М.: Мир, 1971. 629 с.
5. Маккомбер Дж.Д. Динамика спектроскопических переходов. М.: Мир, 1979. 347 с.
6. Семенов А.А. Теория электромагнитных волн, М.: Изд-во МГУ, 1962, с. 256.
7. Гиббс Х. Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света. М.: Мир, 1988. 520 с.