$$p = \exp\left\{-\frac{1}{m}\int R\,dy\right\}\left(C + \frac{2(\alpha-1)}{m^{2\alpha-1}}\int S\exp\left\{\frac{2(1-\alpha)}{m}\int R\,dy\right\}dy\right)^{\frac{1}{2(1-\alpha)}}.$$

Для этих конкретных случаев формулы § 2 приводят к простым квадратурным выражениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волосов В. М., Моргунов Б. И. ДАН СССР, **153**, № 3, 1963.
2. Моргунов Б. И. ДАН СССР, **155**, № 2, 1964.
3. Волосов В. М., Моргунов Б. И. ДАН СССР, **156**, № 1, 1964.
4. Моисеев Н. Н. «Журн. вычисл. матем. и мат. физ.», **3**, № 1, 1963.
5. Черноусько Ф. Л. «Журн. вычисл. матем. и мат. физ.», **3**, № 1, 1963.
6. Арнольд В. И. ДАН СССР, **161**, 1, 1965.
7. Ярошевский В. А. «Журн. вычисл. матем. и мат. физ.», **4**, № 2, 1964.

Поступила в редакцию
20. 10 1964 г.

Кафедра
математики

УДК 621.372.061.3

Д. Н. КЛЫШКО, В. С. ТУМАНОВ, В. П. ЯРЫГИН

ВЫЧИТАНИЕ ЧАСТОТЫ В ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЕ

В работах [1, 2] рассмотрен эффект вычитания частоты за счет нелинейных свойств трехуровневой квантовой системы. Аналогичный эффект возможен и в случае двухуровневой системы, обладающей диагональными матричными элементами дипольного момента $\vec{\mu}$. В настоящем сообщении приводятся результаты наблюдения этого эффекта на радиочастотах с помощью зеемановских уровней свободного радикала дифенилпикрилгидразила (ДФПГ).

Расчет эффекта нетрудно выполнить исходя из уравнений для матрицы плотности с феноменологическими временами релаксации T_1 и T_2 (см., например, [3]). Пусть на систему с боровской частотой ω_0 действуют 2 монохроматические поля

$$(\vec{H}_1 e^{i\omega_1 t} + \vec{H}_2 e^{i\omega_2 t} + \text{к. с.})/2 \text{ и пусть выполнены условия } \omega_0 T_2 \gg 1:$$

$$\omega_{1,2} \sim \omega_0,\ |\vec{\mu}_{12}\vec{H}_1/\hbar| \ll \omega_0 \text{ и } |\vec{\mu}_{12}\vec{H}/\hbar|^2 \ll 1/T_1T_2{}^*.$$

В этом случае получается следующее выражение для фурье-компонента намагниченности (или поляризации) системы на разностной частоте $\omega_1-\omega_2$:

$$\vec{M} = \vec{M}_0 v_1^* v_2 R, \tag{1}$$

$$R \equiv \frac{x-i}{(1+x^2+|v_1|^2T_1/T_2)}\cdot\frac{(z+2i)(z+x+i)}{(z+iT_2/T_1)(z-x+i)(z+x+i)-|v_1|^2(z+i)},$$

где $M_0 \equiv (\mu_{11}-\mu_{22})\dfrac{\Delta N}{2}$ — равновесная статическая намагниченность образца (ΔN — разность населенностей) и введены безразмерные величины $\bar{v}_{1,2} \equiv -\vec{\mu}_{12}\vec{H}_{1,2}T_2/\hbar$, $x \equiv (\omega_1-\omega_0)T_2$, $z \equiv (\omega_1-\omega_2)T_2$.

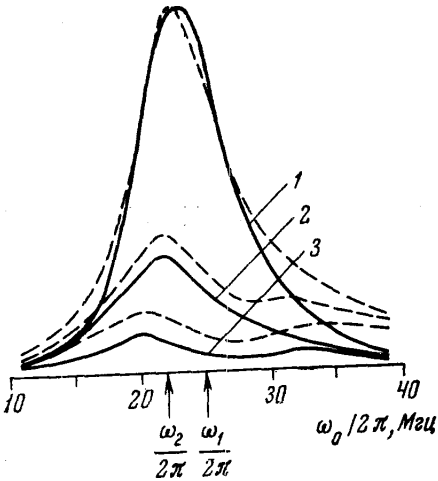
* При этом в общем случае следует учитывать и поле с частотой $2\omega_1-\omega_2$, возникающее за счет нелинейности системы [4], однако в условиях нашего эксперимента это поле пренебрежимо мало. По этой же причине мы не учитываем обратного влияния на систему поля с частотой $\omega_1-\omega_2$.

В случае «магнитной» двухуровневой системы с $T_1=T_2$ из (1) следует

$$|\vec{M}| = (\gamma T_2)^2 \chi_0 H_0 |H_1 H_2 R|/4,$$
$$|R|^2 = \frac{1+x^2}{(1+x^2+|v_1|^2)^2} \cdot \frac{(z^2+4)[(z+x)^2+1]}{(z^2+1)[(z^2-x^2-1-|v_1|^2)^2+4z^2]}, \qquad (2)$$

где мы ввели статическую восприимчивость $\chi_0 \equiv M_0/H_0$ и гиромагнитное отношение $\gamma \equiv \omega_0/H_0$ ($\vec{H}_0$ — напряженность постоянного магнитного поля) и приняли, что переменные поля линейно поляризованы и перпендикулярны $\vec{H}_0$ ($\vec{M}$ параллельно $\vec{H}_0$).

При экспериментальной проверке (2) несколько граммов поликристаллического ДФПГ помещалось в систему из трех катушек индуктивности с взаимно перпендикулярными осями. На две катушки подавалось напряжение с частотами $\omega_1/2\pi=25$ *мгц* и $\omega_2/2\pi=22$ *мгц*, причем напряжение с частотой 22 *мгц* было достаточно малым, чтобы не вызывать эффекта насыщения. Ось третьей катушки, настроенной на 3 *мгц*, располагалась параллельно $\vec{H}_0$. Наведенный в этой катушке сигнал разностной частоты после усиления и детектирования наблюдался на экране осциллографа при периодической модуляции величины H_0.



Зависимость напряжения разностной частоты (в произвольных единицах) от величины постоянного магнитного поля (сплошные линии — эксперимент, пунктирные — теория)

На рисунке представлены в произвольных единицах экспериментальные (сплошные линии) и теоретические (пунктирные линии) зависимости $|\vec{M}|$ от ω_0 для трех значений H_1: 1—2,3, 2—3,6 и 3—5,0 *эрст*. Теоретические графики были построены по формуле (2), причем масштаб по вертикали подбирался для наилучшего совпадения расчетных и экспериментальных графиков в случае $H_1=2{,}3$ *эрст*; расчет производился исходя из значения T_2, соответствующего ширине линии ΔH при обычном парамагнитном резонансе ($\Delta H = 2{,}1$ *эрст*).

Из рисунка видно, что теоретические и экспериментальные зависимости близки. Наблюдаемое расхождение объясняется, по-видимому, тем, что равенство $T_1=T_2$ часто не выполняется в случае ДФПГ (см., например, [5]). Результаты описанного эксперимента подтверждают возможность вычитания частоты с помощью двухуровневых поляризованных систем.

Следует заметить, что эффект преобразования частоты в ферритах (см., например, [6]) имеет много общего с рассмотренным. Существенно, однако, что в случае двухуровневой системы коэффициент преобразования может быть увеличен за счет параметрической регенерации системы на частоте сигнала, наблюдаемой при частичном насыщении ее полем с частотой ω_1 [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Файн В. М., Ханин Я. Н., Яшин Э. Г. «Изв. высш. учебн. завед.», радиофизика, 5, 697, 1962.
2. Wells W. H. J. Appl. Phys., 33, 1851, 1962.
3. Anderson P. J. Appl. Phys., 28, 1049, 1957.
4. Senitzky B., Gould G., Cutler S. Phys. Rev., 130, 1460, 1963.
5. Krishnaji, Wirsa B. N. Phys. Rev., 135A, 1068, 1964.
6. Гуревич А. Г. Ферриты на СВЧ. М., Физматгиз, 1960.

Поступила в редакцию
1. 2 1965 г.

Кафедра
радиотехники