

## ЗАВИСИМОСТЬ УСИЛЕНИЯ МНОГОРЕЗОНАТОРНЫХ КВАНТОВЫХ ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ (КПУ) ОТ МОЩНОСТИ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Р. А. МАРТИРОСЯН

Рассматривается зависимость коэффициента усиления в общем виде для многорезонаторных КПУ, в зависимости от мощности входного сигнала. Получены выражения для этой зависимости, в частности, для одноконтурного и двухконтурного КПУ, а также для КПУ со входным пассивным резонатором. Из полученных выражений следует, что многорезонаторные КПУ обладают лучшими динамическими характеристиками по сравнению с одноконтурными КПУ.

Как известно, КПУ делятся на две основные группы: КПУ бегущей волны — КУБВ и резонаторные — РКУ. Квантовые усилители бегущей волны имеют ряд преимуществ по сравнению с РКУ. Эти усилители более широкополосные и работают более устойчиво. Однако, создание и конструирование КУБВ в дециметровом диапазоне волн связано с большими трудностями [1], к тому же своими характеристиками они почти не отличаются от многорезонаторных квантовых усилителей.

В последние годы появилось много теоретических [2, 3] и экспериментальных работ [1, 4, 5, 7], посвященных исследованиям свойств многорезонаторных квантовых парамагнитных усилителей как единственных широкополосных систем длинноволнового дециметрового диапазона.

Известно, что если на вход любого усилителя подать мощный сигнал, то усилитель насыщается и начальное усиление падает до некоторого уровня. Зависимость коэффициента усиления квантового усилителя от мощности входного сигнала легко найти [6, 7], учитывая, что добротность активного вещества обратно пропорциональна достигнутой инверсии, а величина инверсии  $I$  через вероятность индуцированного излучения на частоте сигнала  $W_{\text{спг}}$  определяется плотностью поля излучения на частоте сигнала, т. е. мощностью сигнала на входе усилителя  $P_{\text{вх}}$ .

Величина инверсии, соответственно и коэффициент усиления усилителя, определяются магнитной добротностью активного вещества.

Для определения зависимости коэффициента усиления отражательного многорезонаторного КПУ от входного сигнала необходимо сначала определить зависимость  $Q_m$  от входного сигнала, а затем полученные соотношения подставить в выражение для коэффициента усиления многорезонаторного КПУ. Для простоты ограничимся двумя активными связанными резонаторами. Для общего случая задача решается аналогичным образом, только полученные выражения становятся более громоздкими и необозримыми.

Парамагнитный кристалл в резонаторном КПУ характеризуется отрицательной магнитной добротностью равной

$$Q_m = Q_{m0}(1 + WT),$$

где

$$WT = |\mu|^2 V \hbar T_2 T_1 H_c^2(x) \frac{1}{1 + Q_1 x^2}, \quad (1)$$

$$H_c^2(x) = \frac{2\gamma}{\gamma V} Q_M (1 + Q_1 x^2) P_{изл},$$

здесь  $V$  — объем резонатора,  $H_c(x)$  — средняя энергия запасенная в резонаторе,  $\gamma$  — фактор заполнения,  $T_1$  — время спин-решеточной релаксации,  $T_2$  — время спин-спиновой релаксации,  $|\mu|^2$  — квадрат модуля матричного элемента перехода сигнала.

Резонансный коэффициент усиления мощности  $G$  для КПУ с двумя активными резонаторами можно представить в виде [1]

$$G = \left( \frac{1/Q_{M1} Q_{M2} + 1/Q_{M2} Q_{св} + x^2}{1/Q_{M2} Q_{св} - 1/Q_{M1} Q_{M2} - x^2} \right)^2, \quad (2)$$

где  $Q_{M1}$ ,  $Q_{M2}$  — добротности активных веществ в первом и втором резонаторе соответственно,

$x$  — коэффициент связи между резонаторами,

$Q_{св}$  — добротность связи, обусловленная потерями в линии.

В установившемся режиме энергия, запасенная в резонаторах, постоянная, т. е.

$$P_{вх} + P_{изл}^{(1)} + P_{изл}^{(2)} - P_{пот} - P_{вых} = 0. \quad (3)$$

Здесь  $P_{вх}$  и  $P_{вых}$  — входная и выходная мощности соответственно;  $P_{пот}$  — суммарная мощность потерь в стенках резонаторов и диэлектрических потерь,  $P_{изл}^{(1)}$ ,  $P_{изл}^{(2)}$  — мощности излучаемые активными веществами первого и второго резонаторов соответственно.

В нашем рассмотрении пренебрегаем потерями  $P_{пот}$  и тогда (3) переходит в

$$P_{вх} + P_{изл}^{(1)} + P_{изл}^{(2)} - P_{вых} = 0,$$

следовательно,

$$P_{изл}^{(1)} + P_{изл}^{(2)} = (G - 1) P_{вх}, \quad (4)$$

где  $G = P_{вых}/P_{вх}$  определяется формулой (2).

Для точного вычисления зависимости добротности активного вещества (следовательно и усиления КПУ с двумя активными резонаторами) от мощности входного сигнала необходимо знать распределения высокочастотных полей в резонаторах. Однако, достаточно произвести приближенную оценку, связывая мощность сигнала  $P_{вх}$  с величиной  $H_c^2$  — магнитного поля сигнала через добротность активного вещества.

Для обоих резонаторов в общем случае с учетом ширины линии поглощения ЭПР по сигнальному переходу имеем

$$H_{c_1}^2(x) = \frac{2\gamma}{\gamma V} Q_{M1} (1 + Q_1 x^2) P_{изл}^{(1)}, \quad (5)$$

$$H_{c_2}^2(x) = \frac{2\gamma}{\gamma V} Q_{M2} (1 + Q_1 x^2) P_{изл}^{(2)}. \quad (6)$$

Здесь —  $Q_1 \equiv \frac{\gamma_L}{\Delta \gamma_L}$ , где  $\Delta \gamma_L$  — ширина линии поглощения.

Из эквивалентной схемы двух активных связанных резонаторов можно получить

$$H_{c_2}^2(x) = \frac{x^2}{1/Q_{M2}^2 + x^2} H_{c_1}^2(x). \quad (7)$$

Из выражений (7), (6), (5), (4), и (1) с учетом (2) можно определить  $Q_{M1}$  и  $Q_{M2}$  в зависимости от начальных добротностей  $Q_{M10}$ ,  $Q_{M20}$  и входного сигнала  $P_{вх}$  при усилении  $G$ .

При резонансе имеем

$$Q_{M1} = Q_{M10} [1 + SP_{вх} (G^{1/2} + 1)^2], \quad (8)$$

$$Q_{M2} = \frac{Q_{M20}}{1 - SP_{вх} Q_{M20} (G - 1) \left[ 1 - \frac{Q_{св} (G^{1/2} + 1)}{Q_{M10} (G^{1/2} - 1) [1 + SP_{вх} Q_{св} (G^{1/2} + 1)^2]} \right]}, \quad (9)$$

где

$$S = \frac{2|\mu|^2 T_2 T_1 \gamma}{f^2 V}.$$

Подставляя значения  $Q_{M1}$ ,  $Q_{M2}$  в выражение коэффициента усиления двухрезонаторного КПУ, получим

$$G^{1/2} = \frac{Q_{M10}/Q_{св} + SP_{вх} (G^{1/2} + 1) Q_{M10} + F(x^2, Q_{M10}, Q_{M20}, S', P_{вх}, G)}{Q_{M10}/Q_{св} + SP_{вх} (G^{1/2} + 1)^2 Q_{M10} - F(x^2, Q_{M10}, Q_{M20}, S', P_{вх}, G)}, \quad (10)$$

где

$$F = \frac{x^2 Q_{M10} Q_{M20} [1 + SP_{вх} Q_{св} (G^{1/2} + 1)^2]}{1 - SP_{вх} Q_{M20} (G - 1) \left[ 1 - \frac{Q_{св} (G^{1/2} + 1)}{Q_{M10} (G^{1/2} - 1) [1 + SP_{вх} Q_{св} (G^{1/2} + 1)^2]} \right]}.$$

Полученное выражение (10) представляет зависимость коэффициента усиления двухрезонаторного КПУ от мощности входного сигнала. В (10) положив  $Q_{M10} \approx Q_{M20} \approx 1/x^2$  и выражая начальные добротности через начальное усиление  $G_0$ , получим

$$G^{1/2} = \frac{2G_0^{1/2} + SP_{вх} (G^{1/2} + 1)^2 (G_0^{1/2} - 1) + [G_0^{1/2} (1 - x^2 Q_{св})] \cdot f(x^2, S, P_{вх}, G)}{2 + SP_{вх} (G^{1/2} + 1)^2 (G_0^{1/2} - 1) - [G_0^{1/2} (1 - x^2 Q_{св})] \cdot f(x^2, S, P_{вх}, G)}, \quad (11)$$

где

$$f = \frac{1 + SP_{вх} (G^{1/2} + 1)^2}{1 - SP_{вх} 1/x^2 (G - 1) \left[ 1 - \frac{Q_{св} (G^{1/2} + 1)}{1/x^2 (G^{1/2} - 1) [1 + SP_{вх} (G^{1/2} + 1)^2]} \right]}.$$

Из выражения (10), можно получить аналогичные выражения как для однорезонаторного, так и двухрезонаторного КПУ с входным пассивным резонатором, положив соответственно

$$x^2 = 0 \quad \text{и} \quad Q_{M10} = \infty.$$

Подставив в (10)  $x^2 = 0$ , для зависимости коэффициента усиления однорезонаторного КПУ от мощности входного сигнала можно получить выражение

$$G^{1/2} = \frac{2G_0^{1/2} + SP_{\text{вх}}(G^{1/2} + 1)^2(G_0^{1/2} - 1)}{2 + SP_{\text{вх}}(G^{1/2} + 1)^2(G_0^{1/2} - 1)}. \quad (12)$$

Решая полученное уравнение относительно  $P_{\text{вх}}$ , получаем

$$P_{\text{вх}} = \frac{2}{S} \frac{G_0^{1/2} - G^{1/2}}{(G_0^{1/2} - 1)(G^{1/2} + 1)(G - 1)}.$$

При условии  $G \gg 1$  последнее переходит в

$$P_{\text{вх}} = \frac{2}{SG_0^{1/2}} \left[ \left( \frac{G}{G_0} \right)^{-1/2} - \left( \frac{G}{G_0} \right)^{-1} \right]. \quad (13)$$

Последнее выражение практически совпадает с результатом (7), полученным несколько иным путем.

Полагая в (13)  $G = 0,5 G_0$ , можно найти мощность насыщения при  $G_0 \gg 1$ .

$$P_{\text{нас}} = \frac{3,2}{SG_0^{1/2}}. \quad (14)$$

Для КПУ с входным пассивным резонатором получается:

$$G^{1/2} = \frac{2G_0^{1/2} + SP_{\text{вх}}(G^{1/2} + 1)^2(G_0^{1/2} - 1) \left[ \frac{2G_0^{1/2}}{Q_0(G_0^{1/2} - 1)} - \frac{G - 1}{Q_{\text{св}}(G^{1/2} + 1)^2} - SP_{\text{вх}}(G - 1) \right]}{2 + SP_{\text{вх}}(G^{1/2} + 1)^2(G_0^{1/2} - 1) \left[ \frac{2}{Q_0(G_0^{1/2} - 1)} - \frac{G - 1}{Q_{\text{св}}(G^{1/2} + 1)^2} - SP_{\text{вх}}(G - 1) \right]}, \quad (15)$$

где  $Q_0 = Q_{M20}$ .

Решая (15) относительно  $P_{\text{вх}}$ , получаем

$$P_{\text{вх}} = \frac{2}{S} \frac{Q_{\text{св}} Q_0 (G_0^{1/2} - G^{1/2})}{Q_0 (G_0^{1/2} - 1)(G - 1)(1 - G^{1/2}) - 2Q_{\text{св}}(G^{1/2} + 1)^2(G_0^{1/2} - G^{1/2})}. \quad (16)$$

Как и в предыдущем случае, положив в (16)  $G = 0,5 G_0$ , можно получить выражение для мощности насыщения  $P_{\text{нас}}$ .

Как видно из (14),  $P_{\text{вх}}$  зависит от фактора насыщения  $S$  и от начального усиления  $G_0$ . Полученные соотношения (11), (12), (15) прежде всего подтверждают тот факт, что коэффициент усиления многорезонаторных КПУ сильно зависит от входной мощности. Мощность насыщения в основном зависит от полного числа частиц в данном усилителе и от времени спин-решеточной релаксации. Таким образом, при заданном начальном усилении улучшения динамической характеристики можно добиться уменьшением времени спин-решеточной релаксации  $T_1$  и увеличением полного числа частиц в усилителе.

На рис. 1 приведены кривые зависимости коэффициента усиления однорезонаторного (а), (б) и двухрезонаторного КПУ (с) с входным пассивным резонатором. Кривые (а) и (б) относятся к различным начальным усилениям  $G_0 = 50$  и  $100$ . Кривые (б) и (с) построены при одинаковом начальном усилении  $G_0 = 100$ . Сравнение этих кривых показывает, что двухрезонаторный КПУ насыщается сравнительно при больших входных сигналах, чем одноконтурный КПУ.

Если учесть то обстоятельство, что во многорезонаторном КПУ, как и в квантовом усилителе бегущей волны, объем активного вещества можно делать много раз больше, чем в однорезонаторном усилителе, то при прочих равных условиях мощность насыщения многорезонаторного КПУ несколько раз больше, чем у однорезонаторного КПУ.

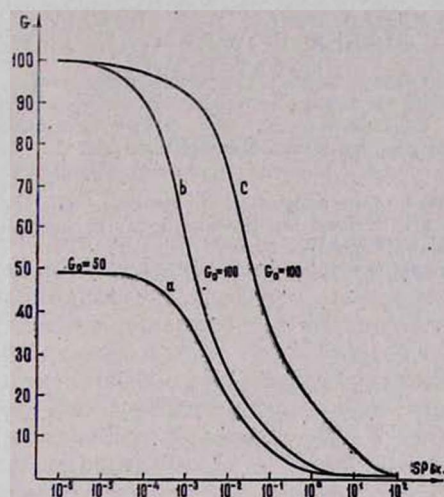


Рис. 1.

Приведенный анализ показывает, что многорезонаторные КПУ наряду с другими характеристиками — полоса пропускания, устойчивость работы, также обладают лучшими динамическими характеристиками по сравнению с однорезонаторными КПУ.

Институт радиофизики и электроники  
АН Армянской ССР

Поступила 24/VII—65

## ЛИТЕРАТУРА

1. Р. М. Мартirosян, А. М. Прохоров, Радиотехника и электроника, 9, 12 (1964).
2. Н. В. Карлов, А. М. Прохоров, Радиотехника и электроника, 8, 3 (1963).
3. В. Б. Штейншлегер, Радиотехника и электроника, 4, 11 (1959).
4. Р. М. Мартirosян, А. М. Прохоров, ПТЭ, 1, 106 (1964).
5. R. L. Kuhl, R. A. Macfarlane, M. W. Strandberg, Proc. IRE, 50, 7 (1962).
6. Н. В. Карлов, А. А. Маненков, Известия Вузов "Радиофизика" 7, 1 (1964).
7. П. Батчер, Теория трехуровневых парамагнитных усилителей. Квантовые парамагнитные усилители, ИЛ, Москва (1961).

ԲԱԶՄԱՌՆԶՈՆԱՏՈՐԱՅԻՆ ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ՊԱՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՈՒԺԵՂԱՐԱՐՆԵՐԻ  
ՈՒԺԵՂԱՅՄԱՆ ԿԱԼԻԲՐՄԱՆ ՄՈՒՏՔԱՅԻՆ ԱԶԳԱՆՇԱՆԻ ՀԶՈՐՈՒԹՅՈՒՆԻՑ

Բ. Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

Հորվածում դիտարկվում է ընդհանրապես բազմառնգոնատորային քվանտային ուժեղարարի ուժեղացման զործակցի կախումը մուտքային ազդանշանի հզորությունից: Այդ կախումը պար-

զելու համար նախ ստացված են արտահայտություններ պարամագնիսական ակտիվ նյութի բարորակության և մուտքային ազդանշանի հզորության կախման համար՝ (8), (9)։ Ստացված արտահայտությունները տեղադրելով ուժեղացման գործակցի (2) արտահայտության մեջ, նշված կախման համար ստացված են վերջնական արտահայտություններ՝ (11), (12), (15)։

Կատարված վերլուծումներից հետևում է, որ բազմառեզոնատորային քվանտային ուժեղաբարենբը ունեն ավելի լավ դինամիկ հատկություններ, քան միառեզոնատորային քվանտային ուժեղարարները։

## COUPLED-CAVITY MASER POWER GAIN DEPENDING ON INPUT SIGNAL POWER

by R. M. MARTIROSIAN

Coupled-cavity maser gain depending, in general, on the input signal power, is considered. Expressions are derived for the single-cavity and double-cavity masers and also for the maser with input passive-cavity.

Coupled-cavity masers display better dynamic characteristics as compared to single-cavity masers.