

УДК 537.622.3

## ШИРОКОПОЛОСНЫЙ РЕЗОНАТОРНЫЙ КВАНТОВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С НИЗКИМ УРОВНЕМ НАКАЧКИ НА ДИАПАЗОН ЧАСТОТ 40 — 45 ГГц

*А. К. Блинов, В. В. Мышенко, С. А. Песковацкий, В. М. Шульга*

Экспериментально показана возможность расширения полосы пропускания однорезонаторного квантового усилителя 7-миллиметрового диапазона при разориентации магнитных комплексов ионов  $Fe^{3+}$  в андалузите. Создан квантовый усилитель с полосой пропускания 100 МГц и коэффициентом усиления 20 дБ. Измеренная шумовая температура усилителя составила  $25 \pm 5$  К.

В последние годы интенсивно развивается спектральная радиоастрономия миллиметрового диапазона. Для решения ее задач требуются приемные системы чрезвычайно высокой чувствительности в полосе частот не менее 100 МГц [1]. Среди известных приемных устройств миллиметрового диапазона наибольшую чувствительность удается реализовать в приемных системах с квантовыми усилителями (КУ) на входе, которые заметно отличаются от других приемных устройств значительно меньшим уровнем собственных шумов.

В миллиметровом диапазоне полосы пропускания более 100 МГц получены в КУ бегущей волны. Однако они требуют для своей работы, как правило, больших мощностей накачки (свыше 1 Вт [2]). Резонаторным КУ требуются более низкие мощности накачки, но обычно их полоса пропускания заметно уже, чем у КУ бегущей волны. В работе [3] было показано, что в миллиметровом диапазоне можно расширить полосу пропускания однорезонаторного КУ почти до уровня КУ бегущей волны при сохранении преимуществ по требованиям к мощности накачки. В нашей работе приводятся результаты разработки резонаторного КУ с полосой пропускания 100 МГц с использованием разориентации двух магнитных комплексов ионов  $Fe^{3+}$  в андалузите.

**Активный кристалл.** Для реализации расширения полосы пропускания резонаторного КУ необходимо, чтобы добротность линии ЭПР существенно превышала магнитную добротность активного вещества. Этому условию удовлетворяет кристалл андалузита с примесью ионов трехвалентного железа при перпендикулярной ориентации постоянного магнитного поля на частотах выше 25 ГГц. Созданный усилитель работает на частотах около 40 ГГц, где добротность линии ЭПР  $Q_{л} = 280$ , а магнитная добротность вещества составляет порядка  $Q_{m} = 10$  [4].

Инверсионные характеристики андалузита в перпендикулярной ориентации магнитного поля для трехуровневой схемы получения инверсии в используемом диапазоне частот исследованы в [5]. При перестройке частоты сигнала от 40 ГГц до 45 ГГц частоты накачки составляют 142 — 147 ГГц, а предельно достижимый коэффициент инверсии изменяется от 1,4 на длинноволновом краю до 0,8 на коротковолновом краю диапазона перестройки усилителя.

**Электродинамическая система квантового усилителя.** Электродинамическая система КУ представляет собой бимодальный резонатор. Конструкция резонатора схематически представлена на рис. 1, где показана и ориентация магнитных  $z$ -осей кристалла. Резонатор обра-

зован кристаллом андалузита (1) размерами  $1,9 \times 1,8 \times 0,36 \text{ мм}^3$ , который помещен в волновод уменьшенных размеров (поперечное сечение  $2,0 \times 0,37 \text{ мм}^2$ ), ограниченный с одной стороны перестроечным поршнем (2). Волновод таких размеров, не заполненный кристаллом, является запредельным. Причем степень запредельности выбирается такой, чтобы обеспечить возможность заданной перестройки резонатора при наименьшей потере в коэффициенте заполнения.

В таком резонаторе возбуждаются две моды: сигнальная мода  $H_{101}$  и мода накачки  $H_{011}$ . Для моды  $H_{011}$  определяющим является размер  $0,36 \text{ мм}$ , поэтому соотношения между остальными размерами можно выбирать, ориентируясь лишь на диапазон перестройки частоты сигнала и обеспечение высокого фактора заполнения.

При выбранных размерах кристалла резонатор перестраивается по частоте сигнала короткозамыкающим поршнем в пределах 10% основной частоты (40—45 ГГц), а фактор заполнения остается достаточно высоким ( $\eta \geq 0,4$ ). Связь с подводщим волноводом можно изменять небольшим перемещением кристалла внутри запредельного волновода. Минимальная инвертированная магнитная добротность (с учетом фактора заполнения) составила около 20. Разработанная конструкция резонатора позволяла обеспечить добротность связи на этом уровне и ниже, а собственная добротность резонатора на частоте сигнала была около 500.

Для возбуждения резонанса моды  $H_{011}$ , наиболее эффективно взаимодействующей с активным веществом, был разработан специальный узел связи. Он представляет собой отрезок круглого запредельного волновода, включенного между резонатором и трактом накачки (см. рис. 1). Степень запредельности отрезка круглого волновода определяется его диаметром и диэлектрической проницаемостью частично заполняющей его диэлектрической вставки (3). Грубо величина связи резонатора на частоте накачки устанавливается изменением размеров диэлектрической вставки, а плавная настройка связи осуществляется короткозамыкающим поршнем (4) в тракте накачки сечением  $1,6 \times 0,8 \text{ мм}^2$ .

Так как во всем диапазоне перестройки усилителя частота накачки изменяется лишь на 3%, то, обеспечив нагруженную добротность резонатора накачки  $Q_n = 50$  при собственной добротности более 100, можно было обойтись без его перестройки по частоте.

**Система невзаимных элементов.** В КУ отражательного типа в качестве устройства для разделения волн, распространяющихся в разных направлениях, обычно используют терхплечие ферритовые Y-циркуляторы. По сравнению с другими типами циркуляторов они имеют меньший вес и габариты, большую полосу частот, малые прямые потери.

Для обеспечения устойчивой работы КУ, как правило, требуется более чем один Y-циркулятор. Отражения, существующие на входе и выходе КУ, приводят не только к неравномерности его частотной характеристики, но и ухудшают стабильность коэффициента усиления КУ. Это затрудняет использование КУ отражательного типа в моду-

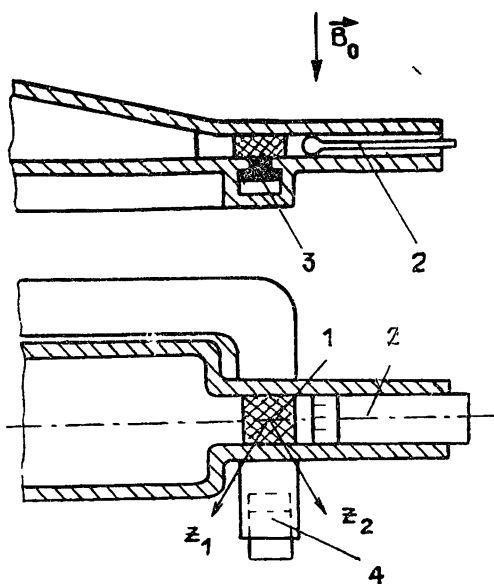


Рис 1

ляционных радиометрах. Поэтому приходится включать дополнительные невзаимные элементы, в качестве которых могут быть использованы либо обычные волноводные вентили, либо работающие в вентиляционной схеме  $Y$ -циркуляторы. Такие элементы подключаются на вход и выход КУ [6].

Добавочные циркуляторы достаточно хорошо развязывают КУ с входными и выходными устройствами, но сами, не обладая идеальными характеристиками, вносят дополнительные отражения. Чтобы это не сказывалось на равномерности частотной характеристики в полосе перестройки КУ, все три  $Y$ -циркулятора и резонатор желательно располагать как можно ближе друг к другу. Такое расположение циркуляторов предполагает их охлаждение до температур  $T \leq 4$  К. Это создает определенные сложности при их настройке.

Для разработанного КУ был специально изготовлен блок из трех  $Y$ -циркуляторов. Характерными особенностями его являются малые габариты и пониженное сечение волноводов ( $5,2 \times 1,3$  мм<sup>2</sup>). Уменьшение габаритов блока было достигнуто благодаря созданию общего корпуса системы невзаимных элементов, включающего в себя кроме трех  $Y$ -разветвлений и необходимые 120-градусные  $H$ -плоскостные изгибы, причем входной и выходной циркуляторы-вентили были разнесены по высоте. Пониженное сечение волноводов позволяет сделать сочленение невзаимной системы и резонатора на малом расстоянии друг от друга, примерно  $(2 \div 3)\lambda$ .

В системе невзаимных элементов КУ использовалась резонансная мода  $E_{110}$  цилиндрического ферродиеlectricкого стержня. Диаметр феррита составлял 1,45—1,50 мм. Ферриты работали в полностью насыщенном состоянии. Постоянное магнитное поле (0,1—0,15 Тл) создавалось самарий-кобальтовыми магнитами. Точная настройка резонанса на центр полосы рабочих частот проводилась подбором высоты цилиндра. Связь диэлектрических резонаторов с волноводами подбиралась при помощи диэлектрических шайб из полистирола, которые насаживались на ферритовые стержни.

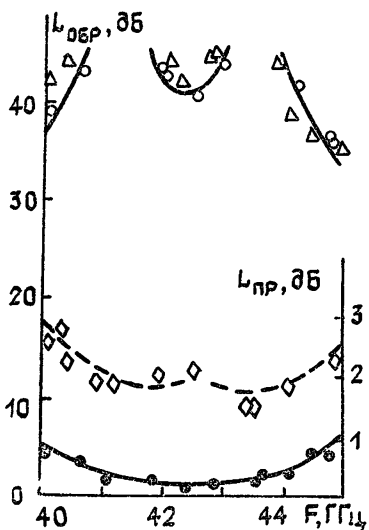


Рис. 2.

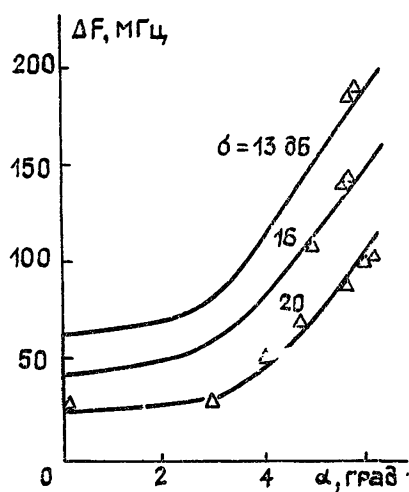


Рис. 3

Полученные характеристики прямого и обратного затуханий невзаимной системы КУ представлены на рис. 2. Обратные затухания входного и выходного плечей невзаимной системы в диапазоне частот 40—45 ГГц превышают 40 дБ. Такого уровня развязки оказывается вполне достаточно, чтобы обеспечить устойчивый режим работы КУ в модуляционном радиометре при коэффициенте усиления вплоть до 20 дБ. Прямые затухания отдельных  $Y$ -циркуляторов не превышают 0,5 дБ. При этом общее затухание проходящего сигнала из входного

плеча системы взаимных элементов в выходное было около 2 дБ (рис. 2, пунктир).

**Расширение полосы пропускания квантового усилителя.** Разработанный КУ с использованием описанных выше узлов обеспечивал полосу пропускания 25 МГц при коэффициенте усиления 20 дБ. Это согласуется с ранее полученными характеристиками резонаторного КУ на андалузите, описанного в работе [7].

Для расширения полосы пропускания, на наш взгляд, наиболее эффективным является метод разориентации магнитных комплексов. В этом случае полоса пропускания КУ непосредственно зависит от угла разориентации их магнитных осей. Нами проведены численные расчеты амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) КУ для разных коэффициентов усиления и углов разориентации. Исходными параметрами расчета служили реально измеренные значения инвертированной магнитной добротности, добротности линии ЭПР и собственной добротности резонатора.

Выражение для АЧХ КУ в этом случае имеет следующий вид:

$$G(f) = 10 \lg \frac{(d_{св} - d_0 + d_m^0 I_n)^2 + (y + d_m^0 I_d)^2}{(d_{св} + d_0 - d_m^0 I_n)^2 + (y + d_m^0 I_d)^2},$$

где  $d_m^0$  — исходный инвертированный магнитный декремент,  $d_0$  — собственный декремент потерь в резонаторе,  $d_{св}$  — декремент связи резонатора с волноводом,  $y = 2(f - f_0)/f_0$  — расстройка резонатора. Выражения для интенсивностей поглощения  $I_n$  и дисперсии  $I_d$  взяты из работы [3].

Зависимость полосы пропускания КУ от угла разориентации для нескольких коэффициентов усиления приведена на рис. 3. При малых углах разориентации ( $1-2^\circ$ ) полоса пропускания увеличивается слабо. При угле  $\alpha \approx 5^\circ$  обеспечивается АЧХ с максимально плоской вершиной. Дальнейшее увеличение угла разориентации приводит к появлению провала в центре характеристики. Максимальная полоса пропускания считается для АЧХ, провал в центре которой равен 3 дБ. Как видно из рисунка, при углах разориентации  $6-7^\circ$  возможно получение полосы пропускания однорезонаторного КУ более 100 МГц при коэффициенте усиления 20 дБ, примерно 150 МГц при коэффициенте усиления 16 дБ и более 200 МГц при коэффициенте усиления 13 дБ.

В эксперименте угол разориентации (до  $10^\circ$ ) обеспечивался соответствующим поворотом и качанием сверхпроводящего магнита.

Отметим трудности практической реализации такого способа расширения полосы пропускания. Важно, чтобы оба разориентированных магнитных комплекса имели одинаковые  $d_m^0$ . Для этого требуется тщательная ориентировка магнитных осей кристалла по отношению к высокочастотным электромагнитным полям непосредственно в рабочем резонаторе КУ, что практически трудно осуществимо. Небольшую неточность ориентировки, приводящую к асимметрии АЧХ, удастся скомпенсировать частотной расстройкой резонатора. Так, 10-процентное различие в интенсивностях линий ЭПР можно скомпенсировать отстройкой резонатора на 0,1% его частоты. Важным моментом практической реализации используемого метода является также необходимость одинакового насыщения переходов накачки для получения равных коэффициентов инверсии на переходах сигнала двух магнитных комплексов.

Одним из возможных способов эквивалентного насыщения переходов является использование частотной модуляции накачки. При этом частота модуляции выбирается много большей всех скоростей релаксации в спиновой системе [8, 9]. Для андалузита она должна быть более 10 КГц. В нашем случае она составляла 200 КГц. Девиация частоты превышала ширину линии ЭПР перехода накачки и была более 2 ГГц. Использование частотной модуляции накачки приводит

к некоторому возрастанию требуемого уровня мощности накачки. Однако наличие резонатора на частоте накачки позволяет сохранить этот уровень достаточно низким.

Результаты экспериментального расширения полосы частот КУ методом разориентации магнитных комплексов показаны на рис. 3 треугольниками. При коэффициенте усиления 20 дБ получена полоса пропускания КУ, равная 100 МГц. При этом мощности накачки менее 100 мВт было достаточно для обеспечения коэффициента неустойчивости усилителя  $\Delta G/\Delta P_n$  ниже 1 дБ/1 дБ. По сравнению с нерасстроенным вариантом КУ требуемая мощность возросла примерно в 2 раза, в то время как его полоса пропускания увеличилась в 4 раза. В качестве источника накачки КУ использовался клинотрон 2-миллиметрового диапазона, описанный в [10].

Измеренная методом холодной—горячей нагрузки шумовая температура созданного КУ составила  $25 \pm 5$  К.

Таким образом, экспериментально показана возможность расширения полосы пропускания однорезонаторных КУ в миллиметровом диапазоне до уровня усилителей бегущей волны. При этом полностью сохраняются преимущества по требуемой мощности накачки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rickard L., Palmer P., Morris M., Zuckerman B., Turner B. E. // *Astrophys. J.* 1975. V. 199. P. L75.
2. Черпак Н. Т., Смирнова Т. А., Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Лавринович А. А. // *Радиотехника и электроника.* 1982. Т. 27. № 9. С. 1804.
3. Еру И. И., Мышенко В. В., Песковацкий С. А. // *Радиофизика.* 1983. Т. 26. № 12. С. 1603 (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Мышенко В. В., Черпак Н. Т. // Тезисы докл. IV Всесоюзной научно-техн. конф. — Новосибирск: Сибирский НИИ метрологии, 1979. С. 176.
5. Mishenko V. V., Cherpak N. T. // *J. Phys. Lett.* 1981. V. 42. № 6. P. L145.
6. Moore C. R., Clauss R. C. // *IEEE Trans.: V. MTT-27.* 1979. № 3. P. 249.
7. Королев В. Д., Песковацкий С. А., Шульга В. М. // *Радиотехника и электроника.* 1982. Т. 27. № 9. С. 1844.
8. Рей Р. Д. // *ТИИЭР.* 1965. Т. 53. № 4. С. 366.
9. Ахумян А. А., Мартиросян Р. М., Погосян Н. Г., Таубе А. Л. // Тезисы докл. XVII Всесоюзной конф. — Ереван, 1985. С. 213.
10. Лысенко Е. Е., Пишко О. Ф., Чурилова С. А. // Тезисы докл. XVII Всесоюзной конф. — Ереван, 1985. С. 162.

Радиоастрономический институт  
АН УССР

Поступила в редакцию  
22 сентября 1986 г.

#### WIDEBAND SINGLE-CAVITY MASER FOR THE FREQUENCY RANGE 40 TO 45 GHz WITH LOW PUMPING LEVEL

*A. K. Blinov, V. V. Myshenko, S. A. Peskovatskij, V. M. Shul'ga*

The possibility of widening considerably the bandwidth of the single-cavity 7 mm maser is shown in a real design. The 100 MHz bandwidth with 20 dB gain is achieved. The measured noise-temperature of the constructed maser equals to  $25 \pm 5$  K on the «warm» flange.