

усиливаемой волны от выхода и входа К. у. внутри волновода (они приводят к нежелательному влиянию внеш. цепей и могут вызвать генерацию). Для этого по др. сторону гребёнки в области, где поляризация магн. поля волны близка к круговой, помещают ферритовый вентиль 4, сильно поглощающий волну с обратным направлением распространения (ферромагнитный резонанс) и незначительно ослабляющий усиливаемую волну (взаимные устройства). Ферромагн. резонанс в вентиле должен происходить при том же значении поля H , что и ЭПР в кристалле. Этого удаётся достичь, используя анизотропию формы ферритового образца, а в миллиметровом диапазоне также применяя ферриты с сильной кристаллографич. анизотропией [3, 7].

В К. у. достигается коэф. усиления $G \sim 25-35$ дБ. Его нестабильность $\sim 1-2\%$, а нестабильность фазы колебаний $\leq 1^\circ$ (применением спец. мер её можно снизить до десятых и даже сотых долей градуса [6]). Мощность входного сигнала, при к-рой величина G уменьшается на 3 дБ вследствие частичного насыщения квантового перехода на частоте сигнала, при усилении непрерывных сигналов порядка $10^{-7}-10^{-8}$ Вт.

Полоса усиления — полоса частот $\Delta f_{ку}$, в пределах к-рой G отличается от максимального не больше чем на 3 дБ, при лорещевой форме линии ЭПР шириной Δf :

$$\Delta f_{ку} = \Delta f \sqrt{3 \cdot [(G_{дБ} + L_{дБ})^{-1} - 1]}$$

Типичное $\Delta f_{ку} \sim 20-30$ МГц. Для расширения полосы по-ле H изменяют вдоль кристалла, тем самым смещая частоту ЭПР по длине кристалла. При этом необходимо применять частотно модулированные генераторы, накачки, чтобы переход накачки был насыщен во всём кристалле. Таким способом удаётся увеличить полосу К. у. до неск. сотен МГц на волнах короче неск. см. Диапазон перестройки центр. частоты превышает неск. ГГц.

Постоянное магн. поле создаётся электромагнитами или соленоидами со сверхпроводящими обмотками, охлаждаемыми до 4,2 К. Для охлаждения всё устройство либо помещают в криостат, в к-рый периодически заливают жидкий He (испаряющийся He собирают и вновь сжижают в холодильной установке), либо используют холодильные машины замкнутого цикла, составляющие вместе с К. у. единое устройство [3].

К. у. с отражённой волной. При $\lambda < 2-3$ см требуемое замедление волны уменьшается. В этом случае используют замедление волны в самом диэлектрич. кристалле:

$$\frac{c}{v_{ГР}} \approx \sqrt{\epsilon}$$

(ϵ — относит. диэлектрич. проницаемость кристалла). В этом случае активный кристалл взаимодействует как с прямой волной, так и с отражённой от конца волновода. При этом длина кристалла, необходимая для получения требуемого коэф. усиления, сокращается вдвое. Входная и выходная волны разделяются с помощью ферритового циркулятора ФЦ. Большое усиление получают, используя неск. каскадов, разделённых циркуляторами (рис. 4).

Резонаторные К. у. Первыми К. у. были резонаторные усилители [2, 5]. Взаимодействие усиливаемой волны с активным парамагн. кристаллом осуществляется в объёмном резонаторе, настроенном на частоту сигнала и накачки. Усиливаемая волна, многократно отражаясь от внутр. стенок резонатора, взаимодействует с активным веществом длительное время, чем и обусловлено большое усиление при сравнительно небольших размерах кристалла. Эфф. время взаимодействия пропорционально нагруженной добротности резонатора, в связи с чем при большой величине коэф. усиления полоса частот очень мала. Для улучшения характеристик использовались многорезонаторные схемы в виде неск. каскадов, разделённых ферритовыми циркулято-

рами (аналогично рис. 4). Каждый каскад содержит связанные резонаторы, заполненные активным парамагн. кристаллом. Недостатком резонаторных К. у. является также сложность их перестройки. Резонаторные К. у. применяются на фиксир. частоте гл. обр. в дециметровом диапазоне, где создание К. у. бегущей

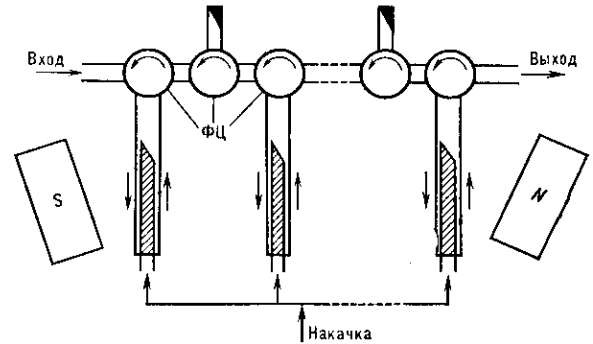


Рис. 4. Схема квантового усилителя с отражённой волной; ФЦ — ферритовые циркуляторы.

волны связано с трудностями, а также в экспериментальных исследованиях в диапазоне λ порядка мм.

Шумы К. у. обусловлены спонтанным излучением при самопроизвольных квантовых переходах с верх. магн. уровня на нижний и тепловым излучением диссипативных элементов К. у. Последнее уменьшается с понижением T и при $T=4,2$ К весьма мало. Интенсивность спонтанного излучения тем меньше, чем ниже частота f , и в радиодиапазоне также невелика, но принципиально эти шумы неустраняемы.

Шумы К. у. характеризуют шумовой температурой $T_{ш}$. Она численно равна темп-ре неотражающей нагрузки на входе К. у., мощность теплового шума к-рой равна мощности шумов К. у. (отнесённой к его входу). При расчёте шумовой темп-ры К. у. используют теорию тепловых шумов обычных диссипативных электрич. цепей, обобщая её на излучающую систему К. у. [2-4]. При этом роль темп-ры отрицат. сопротивления, эквивалентного этой системе, играет отрицат. сплювчатая темп-ра T_s . Можно показать, что при $hf \ll kT$ и $hf < kT_s$:

$$T_{ш} \approx \frac{T}{G} \frac{G_{дБ} + L_{дБ}}{G_{дБ}} + T \frac{L_{дБ}}{G_{дБ}}$$

Первый член суммы обусловлен спонтанным излучением, а второй — тепловым излучением диссипативных элементов К. у. при темп-ре T . Обычно, при $T=4,2$ К $T_{ш} < 4$ К. Вследствие неизбежных потерь во входной линии полная шумовая темп-ра $T_{ш\Sigma} > T_{ш}$. В др. крайнем случае $hf \gg kT_s$ (это условие выполняется при $N_2 \gg N_1$, идеальный К. у.), миним. шумовая темп-ра идеального К. у. и вообще любого линейного усилителя при $L=0$ и $G \gg 1$ [2, 3, 8] равна

$$T_{ш}^{ид} = \frac{hf}{k}$$

Напр., при $\lambda=3$ см и $G \gg 1$ $T_{ш}^{ид} \approx 0,5$ К. В реальных К. у. $T_{ш}$ определяется в основном потерями во входной линии К. у. и составляет (в зависимости от λ и устройства входной линии) 5-15 К.

Применение. Для эффективного применения К. у. шумовая темп-ра фидерного тракта д. б. снижена до величины $\sim T_{ш}$. В связи с этим применяются малозащумящие антенны. К. у. используются в системах дальней космич. радиосвязи с автоматич. станциями, направляемыми к планетам Солнечной системы. Применение К. у. в радионастроении позволило получить ряд важных результатов (СССР, США, Швеция, ФРГ): открыто космич. реликтовое излучение, проведена радиолокация планет Солнечной системы с Земли, обнаружен и исследован ряд спектральных линий кос-