

кристаллах К. у. обычно $\sim 50-100$ МГц и обусловлена спин-спиновыми взаимодействиями парамагн. ионов [1], неоднородностью внутрикристаллич. поля, магн. взаимодействием парамагн. ионов с диамагн. ионами решётки, ядра к-рых обладают магн. моментами (ядерный парамагнетизм), а также неоднород-

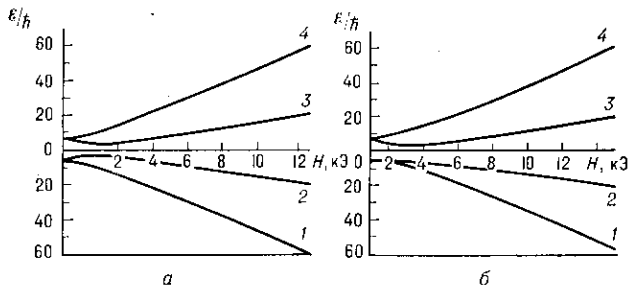


Рис. 2. Уровни Cr в рубине для двух углов θ между внешним магнитным полем H и тригональной осью симметрии кристалла: a — для $\theta = 54^\circ 44'$ (для накачки используются 2 разных по частоте перехода $\mathcal{E}_1 \rightarrow \mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_2 \rightarrow \mathcal{E}_3$, а переход $\mathcal{E}_2 \rightarrow \mathcal{E}_3$ соответствует частоте сигнала); b — для $\theta = 30^\circ$, частота сигнала обычно соответствует переходу $\mathcal{E}_1 \rightarrow \mathcal{E}_2$, а для накачки используется переход $\mathcal{E}_1 \rightarrow \mathcal{E}_3$ или $\mathcal{E}_1 \rightarrow \mathcal{E}_4$; \mathcal{E}/h в ГГц.

ностью внеш. пост. поля H . Естеств. ширина линии, обусловленная спонтанным испусканием между магн. уровнями, пренебрежимо мала, а уширение, связанное со спин-фононным взаимодействием, также мало при низких темп-рах.

Можно показать, что в радиодиапазоне, когда даже при $T=4,2$ К $hf < kT$, для χ'' имеем:

$$|\chi''| \approx 10^{-13} a I \frac{N}{n} \frac{(hf) \sigma^2}{kT \Delta f},$$

где N — число парамагн. ионов в 1 см^3 , n — полное число магн. уровней осн. состояния иона во внешнем магн. поле. У кристаллов К. у. $\chi'' \sim 10^{-3}$. При малых $N |\chi''|$ увеличивается с ростом N , достигая максимума при нек-рой оптимальной концентрации, затем уменьшается из-за уменьшения коэф. инверсии I , что объясняется взаимодействием ионов и др.

Для того чтобы парамагн. кристалл мог быть эффективно использован в К. у., он должен удовлетворять след. требованиям. 1) Парамагн. ион должен обладать в осн. состоянии во внеш. магн. поле системой из трёх или более магн. уровней. При этом расщепления между ними должны позволять усиливать сигналы заданной частоты при частоте накачки, находящейся в технически освоенном диапазоне. Для усиления сигнала обычно используют переход, для к-рого $\sigma \geq 1$. 2) Величина матричного элемента σ_n перехода накачки не должна быть $\sigma_n \ll 1$, чтобы не требовалась большая мощность накачки. По той же причине время спин-решёточной релаксации T_1 для перехода накачки должно быть возможно больше (для *двухуровневых систем* T_1 — величина, обратная вероятности релаксац. переходов A_{21} ; в многоуровневых системах T_1 различно для разных пар уровней и зависит от всех A [1]). Однако излишне большое T_1 на переходе сигнала уменьшает величину максимальной допустимой мощности сигнала на входе. Величина T_1 увеличивается при понижении T , и при $T=4,2$ К $T_1 \sim 10^{-3}-10^{-1}$ с. 3) Коэф. инверсии I желательно иметь возможно большим. В используемых кристаллах $I \sim 1$. Кроме этого необходимы устойчивость кристаллов к физ.-хим. воздействиям, малые диэлектрич. потери и др.

Совокупности перечисленных требований удовлетворяют лишь небольшое кол-во кристаллов. В существующих К. у. используются в основном рубин (кристалл корунда Al_2O_3 с примесью Cr, рис. 2), реже рутил (TiO_2 с примесью Fe или Cr) [6]. В эксперим. К. у. применяются также андалузит (Al_2SiO_5 с при-

месью Fe) и изумруд (берилл $\text{Al}_2\text{Be}_3\text{Si}_6\text{O}_{18}$ с примесью Cr [3-7]).

К. у. бегущей волны. Квантовое усиление можно получить, если бегущая волна распространяется по волноводу, заполненному активным парамагн. кристаллом. Мощность волны возрастает экспоненциально вдоль кристалла. Коэф. усиления — отношение мощности сигнала на выходе К. у. к мощности волны во входной линии (выраженный в дБ):

$$G_{\text{дБ}} = 27,3 \frac{c}{v_{\text{ГР}}} \frac{l}{\lambda} d_m - L_{\text{дБ}}.$$

Здесь l — длина кристалла, λ — длина волны в свободном пространстве, $v_{\text{ГР}}$ — групповая скорость в волноводе с кристаллом, $L_{\text{дБ}}$ — потери энергии в элементах К. у. (в отсутствие ЭПР), d_m — магн. декремент активного кристалла, связанный с величиной χ'' соотношением:

$$d_m = 4\pi |\chi''|_{\text{макс}} \xi.$$

Здесь ξ — коэф. использования кристалла, характеризующий степень заполнения волновода активным кристаллом ($\xi < 1$), а также отклонение направления и поляризации магн. поля волны от оптимальных условий, при к-рых $\sigma = \sigma_{\text{макс}}$.

Для получения требуемой величины коэф. усиления G при $v_{\text{ГР}} \approx c$ и типичных значениях d_m необходимая длина кристалла l неприемлемо велика в диапазоне $\lambda > 1-10$ см. Для сокращения l уменьшают $v_{\text{ГР}}$ (т. е. увеличивают время взаимодействия волны с активным веществом), применяя *замедляющие системы*.

В К. у. бегущей волны (рис. 3) из входной линии I возбуждается бегущая волна, к-рая, распространяясь

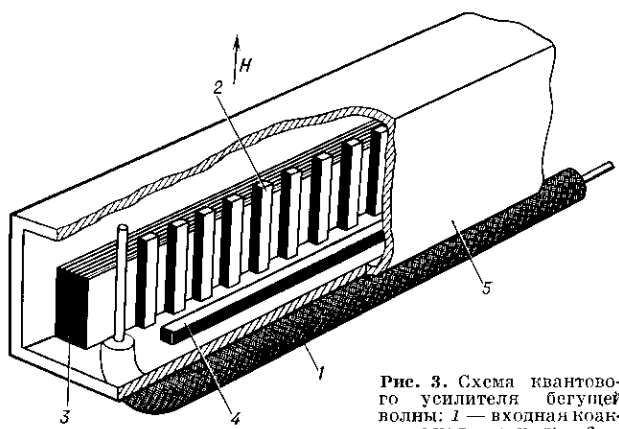


Рис. 3. Схема квантового усилителя бегущей волны: 1 — входная коаксиальная линия; 2 — гребенчатая замедляющая структура; 3 — парамагнитный кристалл; 4 — ферритовый вентиль; 5 — волновод накачки.

вдоль гребенчатой структуры 2 в виде замедленной (в десятки раз) поверхностной волны, усиливается в кристалле 3, расположенном по одну сторону от замедляющей структуры (рис. 3). Паружный отражающий металлич. чехол 5 является частью замедляющей системы, ограничивает объём, в к-ром распространяется эл.-магн. поле, и одновременно служит волноводом, по к-рому распространяется волна накачки. Усиленный сигнал поступает в выходную линию. Пост. поле H направлено вдоль штырей замедляющей структуры, а расположение кристалла обеспечивает требуемый угол θ между кристаллографич. осью и направлением H . Направления вращения вектора магн. поля распространяющейся волны, эллиптически поляризованной в плоскости, перпендикулярной штырям, противоположны по разные стороны гребёнки. Эта особенность используется для устранения «паразитных» эффектов, вызванных многократными отражениями