

для повышения чувствительности радиоприёмных СВЧ-устройств (см. ниже).

Принцип действия. В К. у. для усиления эл.-магн. колебаний используется изменение внутр. энергии частиц при квантовых переходах из возбуждённого состояния в состояние с меньшей энергией. Такими частицами являются парамагн. ионы, изоморфно входящие в виде небольшой примеси (сотые доли %) в кристаллич. решётку диэлектрич. кристалла (парамагн. кристаллы).

Во внеш. магн. поле H осн. уровень парамагн. иона расщепляется на неск. подуровней (см. *Зеемана эффект*). Интервалы между магн. подуровнями зависят от напряжённости магн. поля H , при $H \sim 10^3$ Э они обычно соответствуют СВЧ-диапазону. Вероятность w вынужденных переходов между ними пропорц. квадрату амплитуды магн. СВЧ-поля, воздействующего на ион, и квадрату нек-рой величины σ , характеризующей эффективность взаимодействия этого поля с ионом (σ — матричный элемент магнитно-дипольных переходов, зависящий от свойств иона в кристалле и от поляризации СВЧ-поля [1—5]). Вероятность w одинакова для переходов в нижнего подуровня на верхний и в обратном направлении.

Если совокупность парамагн. ионов в кристалле находится в термодинамич. равновесии с кристаллич. решёткой при темп-ре T , то равновесные населённости N_{1p} и N_{2p} магн. уровней ε_1 и ε_2 ($\varepsilon_2 > \varepsilon_1$) соответствуют распределению Больцмана:

$$\frac{N_{2p}}{N_{1p}} = \exp\left(-\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{kT}\right). \quad (1)$$

Равновесие устанавливается в системе парамагн. частиц в результате их взаимодействия с тепловыми колебаниями кристаллич. решётки (спин-фононное взаимодействие), к-рое вызывает безызлучат. (релаксац.) переходы $\varepsilon_2 \rightarrow \varepsilon_1$ с передачей энергии решётке, а также релаксац. переходы в обратном направлении, имеющие меньшую вероятность. При действии на кристалл магн. поля СВЧ с частотой $f = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)/h$ происходят вынужденные переходы, причём число переходов $\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_2$ больше, чем в обратном направлении, т. к. $N_1 > N_2$ и $w_{12} = w_{21} = w$. В результате ежесекундно $(N_1 - N_2)w$ частиц переходят с нижнего уровня на верхний, отбирая энергию у поля. В установившемся режиме столько же частиц под влиянием спин-фононных взаимодействий совершат релаксационные переходы в обратном направлении, передавая поглощённую энергию кристаллич. решётке, а через неё термостату (жидкому He). Такое резонансное поглощение эл.-магн. энергии соответствует явлению *электронного парамагнитного резонанса* (ЭПР).

Если нарушить термодинамич. равновесие так, чтобы N_2 стало больше N_1 (инверсия населённостей), то интенсивность волны при её прохождении через кристалл будет возрастать, т. к. излучённая волна когерентна с волной, вызвавшей вынужденное испускание. Такой кристалл способен усиливать волну (активный кристалл). Мощность P , излучаемая при этом единицей объёма кристалла,

$$P = (N_2 - N_1) h f w.$$

Существуют методы создания инверсии населённости в двухуровневых системах [2], однако усиление при этом носит нестационарный во времени характер, что для практич. приложений в большинстве случаев неприемлемо. Наиболее эфф. методом, обеспечивающим стационарное усиление, является трёхуровневый метод. На систему парамагн. частиц, обладающих во внеш. магн. поле H тремя (и более) подуровнями $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ($\varepsilon_3 > \varepsilon_2 > \varepsilon_1$), воздействуют вспомогат. излучением (накачкой) на частоте $f_n = (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)/h$. Если интенсивность накачки достаточно велика, так что вероятность w переходов $\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_3$ под действием

накачки значительно превышает вероятности релаксац. переходов, то N_1 и N_3 становятся почти одинаковыми (насыщение перехода $\varepsilon_1 \leftrightarrow \varepsilon_3$). В результате насыщения возникает инверсия населённостей одной из пар уровней $\varepsilon_1 \leftrightarrow \varepsilon_2$ или $\varepsilon_2 \leftrightarrow \varepsilon_3$, а именно на той паре, для к-рой произведение соответствующей

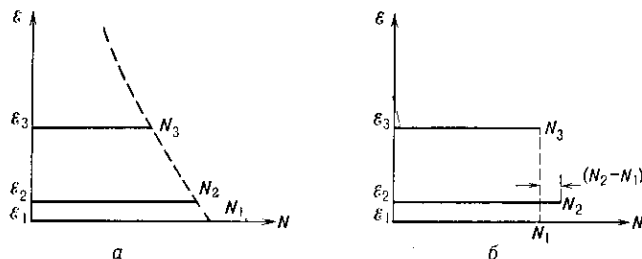


Рис. 1. а — Больцмановское распределение частиц; б — распределение частиц при действии накачки.

частоты f и вероятности релаксационных переходов меньше. Далее для определённости предполагается инверсия на переходе $\varepsilon_1 \leftrightarrow \varepsilon_2$ (рис. 1). Отношение $(N_2 - N_1)/(N_{1p} - N_{2p}) = I$, характеризующее эффективность накачки, наз. коэф. инверсии. Величина I зависит от отношения вероятностей релаксац. переходов между разными уровнями и увеличивается при увеличении отношения f_n/f .

Отношение N_2/N_1 при отсутствии термодинамич. равновесия в системе (системе спиновых магн. моментов всех парамагн. частиц) можно записать аналогично (1) в виде:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{kT_s}\right).$$

Величина T_s , наз. спиновой темп-рой, становится отрицательной ($T_s < 0$) при $N_2 > N_1$.

Активные парамагнитные кристаллы. В К. у. применяются ионные кристаллы с примесью парамагн. ионов элементов группы Fe и др. переходных металлов, сохраняющих при кристаллообразовании недостроенные d - или f -внутр. электронные оболочки, с к-рыми связан их парамагнетизм. Под воздействием электрич. внутрикристаллического поля орбитальный магн. момент иона в основном состоянии в первом приближении равен нулю [1], и магн. момент иона обусловлен гл. обр. его спином. Вследствие остаточного влияния спин-орбитальной связи осн. уровень парамагн. иона во внутрикристаллич. поле расщепляется на неск. магн. подуровней (см. *Штарка эффект*). Величина этого расщепления в кристаллах для К. у. соответствует радиодиапазону. При нечётном числе электронов на недостроенной оболочке иона эти магн. уровни вырождены (*Крамерса теорема*). Вырождение может быть снято только во внеш. магн. поле, где образуется система магн. уровней. Зависимость энергии этих уровней и величины матричных элементов переходов между ними от магн. поля имеет анизотропный характер (угол θ , рис. 2). Это расширяет возможность выбора квантовых переходов, соответствующих частотам сигнала и накачки.

Эффективность активного парамагн. кристалла в К. у. характеризуют величиной мнимой части комплексной магнитной восприимчивости χ'' на частоте f сигнала. При наличии инверсии $\chi'' < 0$, причём

$$|\chi''| = 10^{-13} a (N_2 - N_1) \frac{\sigma^2}{\Delta f}$$

(здесь и далее используется система СГС). Величина $(N_2 - N_1)$ для радиодиапазона обратно пропорциональна темп-ре T (см. ниже), что обуславливает необходимость низких темп-р ($\sim 4,2$ К), при к-рых работает К. у.; Δf (Гц) — ширина линии ЭПР, a — коэф., близкий к 1, зависящий от формы линии ЭПР. Ширина линии в