

упругими свойствами вещества. Упругие волны, т. е. колебания ионов в кристаллич. решётке относительно положения равновесия, в магнитоупорядоченных кристаллах сопровождаются колебаниями спинов, а следовательно, и колебаниями их магн. моментов; в свою очередь колебания спинов, т. е. *спиновые волны*, вызывают смещение ионов. Т. о. появляется связь между фоновой и спиновой, или магнитной, подсистемами. В М. в. изменение магн. параметров состояния (напр., намагниченности) связано с изменением упругих параметров (деформации, механич. напряжения). Возникновение М. в. — одно из проявлений *магнитоупругого взаимодействия*, к-рое в первом приближении можно описать магнитоупругой энергией единицы объёма вещества:

$$U = - b_{iklm} u_{ik} \frac{M_l}{M_0} \frac{M_m}{M_0}, \quad (1)$$

где  $b_{iklm}$  — тензор магнитоупругих констант, имеющий размерность плотности энергии,  $u_{ik}$  — тензор деформаций,  $M_0$  — модуль вектора намагниченности,  $M_l/M_0$  и  $M_m/M_0$  — направляющие косинусы вектора намагниченности. В ф-ле (1) суммирование осуществляется по дважды встречающимся индексам. Здесь рассматриваются только те колебания, в к-рых модуль вектора  $M_0$  остаётся постоянным. Смешанная М. в., в к-рой переменными величинами являются как механические, так и магн. параметры состояния, т. е. и  $u_{ik}$  и  $M_{l,m}$ , наиб. ярко проявляется в области частот, где длина упругой волны оказывается близкой по величине к длине спиновой волны (магнитоакустич. резонанс).

Дисперсионное соотношение для спиновой волны имеет вид

$$\omega = \gamma \left( \frac{2A}{M_0} k^2 + H_i \right)^{1/2} \left( \frac{2A}{M_0} k^2 + H_i + 4\pi M_0 \sin^2 \theta \right)^{1/2}, \quad (2)$$

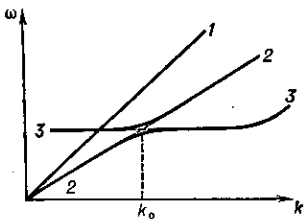
где  $\gamma$  — *магнито механическое отношение* для электрона,  $A$  — обменная постоянная,  $H_i = H_0 - 4\pi N M_0$ ,  $H_0$  — напряжённость внешнего постоянного магн. поля,  $N$  — размагничивающий фактор,  $k$  — волновой вектор,  $\theta$  — угол между направлениями  $H_0$  и  $k$ . Дисперсионные соотношения для продольной и поперечной упругих волн имеют вид  $\omega = c_l k$ ,  $\omega = c_t k$ , где  $c_l$  и  $c_t$  — скорости звука для продольной и поперечной упругих волн.

Особенности поведения М. в. можно рассмотреть на примере плоских волн, распространяющихся вдоль одного из рёбер решётки кубич. кристалла. Если внеш. поле  $H_0$  ориентировано вдоль направления распространения волн ( $\theta = 0$ ), то при наличии магнитоупругой связи дисперсионные соотношения для продольной и поперечной волн примут вид

$$\omega^2 - c_l^2 k^2 = 0, \quad (3)$$

$$\left( \omega^2 - c_t^2 k^2 \right) \left( \omega \pm \omega_{сп} \right) \pm \frac{|\gamma| b^2 k^2}{\rho M_s} = 0. \quad (4)$$

Здесь  $b$  — магнитоупругая константа,  $\rho$  — плотность вещества,  $M_s$  — намагниченность насыщения,  $\omega_{сп}$  — значение  $\omega$ , соответствующее решению дисперсионного соотношения (2). В этом случае продольная часть фонового спектра оказывается не связанной с магн. подсистемой (кривая 1 на рис.), а для поперечных волн возможны два решения  $k_+$  и  $k_-$ , соответствующих двум знакам в соотношении (4). Пересечение дисперсионных кривых поперечной



Дисперсионные кривые в области взаимодействия. 1 — продольная упругая волна, 2 — поперечная упругая волна, 3 — спиновая волна.

упругой (кривая 2) и спиновой (кривая 3) волн происходит при значении волнового числа  $k = k_0$ , т. е.

$$c_l k_0 = \gamma \left( H_i + \frac{2A}{M_0} k_0^2 \right).$$

При  $k \ll k_0$  сплошная кривая 3 — 2 соответствует чисто спиновой волне, а кривая 2 — 3 — чисто поперечной упругой и обе волны распространяются со своими скоростями почти независимо друг от друга. При  $k \gg k_0$  кривая 3 — 2 соответствует упругой волне, а кривая 2 — 3 — спиновой и снова волны почти не зависят друг от друга. В области пересечения существуют две связанные М. в., описываемые соотношением (4). При  $k \approx k_0$  происходит расщепление дисперсионных кривых на две ветви с частотами

$$\omega = \omega_0 \pm \Delta\omega, \quad \text{где } \omega_0 = c_t k_0, \quad \Delta\omega = \sqrt{\gamma b^2 \omega_0 / c_t^2 \rho M_s}$$

(масштаб кривых на рис. преднамеренно сильно искажён, т. к. обычно  $\Delta\omega \ll \omega_0$ ).

При фиксиров. частоте  $\omega$  магнитоупругое взаимодействие обуславливает возможность появления двух волн с волновыми числами  $k_+$  и  $k_-$ , к-рые распространяются с разной скоростью. Это приводит к вращению плоскости поляризации линейно поляризованной сдвиговой волны. Угол  $\varphi$ , на к-рый поворачивается плоскость поляризации в волне, прошедшей расстояние  $z$ , равен

$$\varphi = \frac{z}{2} (k_+ - k_-) = \frac{\gamma b^2 \omega}{2 M_s \rho c_t^2} \cdot \frac{1}{\omega^2 - \omega_n^2 + 2 \omega_n \gamma b^2 / M_s \rho c_t^2},$$

где  $\omega_n = |\gamma| H_0$ .

М. в. могут использоваться для преобразования звуковой волны в спиновую и обратно. В таких материалах, как, напр., монокристаллы ферритов-гранатов, на частотах  $\sim 10^9$  Гц гораздо легче возбудить и принять спиновую волну, чем звуковую. Если образец феррита поместить в СВЧ-резонатор и возбудить в нём спиновую волну, то при наличии пост. магн. поля, неоднородного по пространству, по образцу побегит спиновая волна с переменным волновым числом  $k$ . При уменьшении напряжённости поля  $H$  в направлении распространения спиновой волны и при фиксиров. частоте  $\omega$ , задаваемой резонатором, величина  $k$  по мере распространения будет увеличиваться. Когда она достигнет значения  $k \approx k_0$ , спиновая волна вследствие магнитоупругого взаимодействия превратится в магнитоупругую, а при дальнейшем увеличении  $k$  — в чисто упругую волну. Дальнейшее уменьшение  $H$  уже не будет влиять на характер распространения упругой волны. При таком преобразовании скорость распространения волн изменяется, поскольку скорость упругой волны гораздо больше, чем скорость спиновой волны. Если, начиная с к.-л. точки пространства, величина  $H$  возрастает и, следовательно, волновое число для спиновых волн уменьшается, то может произойти обратное преобразование звуковой волны в спиновую. Т. о., создавая в образце неоднородное магн. поле, можно преобразовывать друг в друга упругие и спиновые волны и тем самым изменять скорость распространения и время прохождения сигнала по образцу.

Взаимодействие спиновых и упругих волн осуществляется на высоких УЗ- и гиперзвуковых частотах, поскольку область существования спиновых волн ограничена снизу частотами  $\sim 10^8$  Гц. Верх. граница для М. в. также определяется возможностью получения спиновых волн и составляет  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  Гц.

Наилучшим материалом для возбуждения М. в. являются ферриты, в частности монокристаллы железонитридевого граната, обладающие высокой добротностью как магнитной, так и упругой подсистем. Эти кристаллы используются в *акустоэлектронике* для изготовления *линий задержки сигналов СВЧ*. Управляя посредством неоднородного магн. поля скоростью распространения сигнала (за счёт преобразования волн), можно