

создавать линии с переменным временем задержки, а используя усиление M в., возникающее из-за нелинейности магнитоупругого взаимодействия, можно добиться значит. снижения потерь при распространении сигнала.

Лит.: Ахнезер А. И., Барьяхтар В. Г., Пелетинский С. В., Спиновые волны, М., 1967; Физическая акустика, под ред. У. Мэсона, пер. с англ., т. 3, ч. Б, М., 1968, гл. 4; т. 4, ч. Б, М., 1970, гл. 5; Моносов Я. А., Нелинейный ферромагнитный резонанс, М., 1971; Такер Дж., Рэмpton В., Гиперзвук в физике твердого тела, пер. с англ., М., 1975; Красильников В. А., Крылов В. В., Введен в физическую акустику, М., 1984. А. Л. Полякова.

МАГНИТОУПРУГОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ — взаимное влияние намагнитченности и упругих деформаций среды (связь спиновой подсистемы кристалла с кристаллич. решёткой). M в. проявляется, напр., в изменении размеров и формы тела (образца) при его намагничивании (*магнитострикция*), а также в изменении намагнитченности при деформации образца (магнитоупругий эффект, или *Виллари эффект*).

Основные представления. M в. обусловлено тем, что осн. взаимодействия магн. моментов атомов или ионов в веществе, напр. *обменное взаимодействие*, магн. *диполь — дипольное взаимодействие*, взаимодействие магн. моментов в *внутрикристаллическом поле*, зависят от расстояния между ними. Намагничивание кристалла изменяет характер этого взаимодействия, что проявляется в изменении расстояний между частицами, а макроскопически — в деформации образца (магнитострикции). В свою очередь изменение расстояния между частицами, т. е. деформация образца, изменяет силу взаимодействия между магн. частицами, а следовательно, и их ср. магн. моменты, т. е. намагнитченность образца, темп-ру Кюри, магн. анизотропию и т. д.

Возникающая при намагничивании деформация приводит к уменьшению отд. составляющих энергии образца — обменной энергии, энергии магн. анизотропии, магнитодипольной энергии. Суммарное изменение энергии образца в результате его деформации при намагничивании определяет магнитоупругую энергию образца (или энергию M в.). С др. стороны, возникновение деформации вызывает нек-рое увеличение энергии упругой деформации, но оно, конечно, меньше выигрыша в энергии M в., иначе не возникла бы магнитострикция.

Различают *изотропный вклад* в энергию M в., обычно имеющий обменное происхождение, и *анизотропный*, связанный с энергией магн. анизотропии. Первый является причиной т. н. объёмной магнитострикции, к-рая вносит вклад в тепловое расширение образца, обладает характерной аномалией в районе *Кюри точки*, но не меняет кристаллографич. симметрии вещества. Анизотропная часть M в. приводит к т. н. линейной магнитострикции и соответствующему изменению кристаллографич. симметрии кристалла, в соответствии с изменением *магнитной симметрии*.

M в. оказывает влияние на фазовые переходы в точках Кюри и Нееля (см. *Магнитный фазовый переход*). Оно, в частности, может быть ответственно за то, что эти фазовые переходы протекают как переходы 1-го рода. Давая в нек-рых материалах значит. вклад в энергию магн. анизотропии, M в. является причиной *ориентационных фазовых переходов*, например в $(Y Tb)_3Fe_5O_{12}$, RFe_2 (R — редкоземельный элемент).

В динамике магнитоупорядоченных сред M в. проявляется как *взаимодействие упругих волн* (фононов) и *спиновых волн*, приводящее к возникновению *магнитоупругих волн*. Для характеристики влияния M в. на динамич. процессы вводят коэф. магнитоупругой связи, к-рый представляет собой отношение энергии M в. в магнитоупругой волне к среднему геометрическому от энергий упругой и спиновой подсистем. Для ферромагн. кристалла:

$$\xi = (\chi B^2 / CM^2)^{1/2},$$

где C — модуль упругости материала, M — намагнитченность, χ — квазистатич. *магнитная восприимчивость*, B — характерное значение энергии M в. (или, точнее, магнитоупругих параметров M в., см. ниже). Для типичных ферромагн. материалов: $B \sim 10^6 - 10^7$ эрг/см³, $C \sim 10^{12}$ эрг/см³, $M^2 \sim 10^4 - 10^6$ эрг/см³, $\chi \sim 1$ и коэф. связи $\xi \sim 10^{-2} - 10^{-1}$. При такой слабой связи можно рассматривать волны, распространяющиеся в ферромагн. кристалле, как *невзаимодействующие чисто упругие и спиновые волны*. Иная ситуация возникает в условиях пересечения спектров упругих и спиновых волн, где M в. становится сильным и приводит к разнообразным интересным эффектам (например, *магнитоакустическому резонансу*). Сильной магнитоупругой связью обладают нек-рые соединения редкоземельных металлов и актиноидов с металлами группы железа, напр. $TbFe_2$, UFe_2 , аморфные сплавы типа $Fe-Si-B$, $Co-Fe-Si-B$, а также $\alpha-Fe_2O_3$, $FeVO_3$, $MnCO_3$, $CoCO_3$, $CsMnF_3$ и антиферромагн. кристаллы с анизотропией типа «лёгкая плоскость» ($\xi \lesssim 1$). В последних M в. ответственно за существование энергии активации низкочастотных спиновых волн — эффект магнитоупругой щели в спектре магнонов (А. С. Боровик-Романов, Е. Г. Рудашевский, Е. А. Туров, В. Г. Шавров, 1964).

Под влиянием M в. возникает ΔE -эффект (см. *Магнитострикция*) и происходит изменение скорости звука под воздействием магн. поля, достигающее 50% и более в веществах с большим коэф. магнитоупругой связи. Высокая чувствительность упругих модулей к воздействию магн. поля в таких материалах является основой параметрич. магнитоупругих явлений (параметрич. возбуждение магнитоупругих волн, преобразование спектра бегущих магнитоупругих волн, генерация гармоник, управляемая фокусировка звука неоднородным магн. полем и т. д.). M в. ответственно за акустич. эффекты Фарадея и двойного лучепреломления, а также эфф. ангармонизм упругой подсистемы (В. И. Ожогин, В. Л. Преображенский, 1977) [4].

M в. широко используется в технике; в частности, на нём основаны разнообразные *магнитострикционные преобразователи*.

M в. представляет большой интерес для функциональной электроники (управляемые магн. полем линии задержки, перестраиваемые резонаторы и фильтры, фазовые модуляторы, конвольверы, анализаторы спектра и др.). В СВЧ-электронике активно исследуют M в. поверхностных акустич. волн с *магнитоакустическими волнами* в магн. плёнках ($Y_3Fe_5O_{12}$, Tb_xFe_{1-x} и др.).

Феноменологическое описание M в. При теоретич. описании M в. широко используется феноменологич. подход, основанный на теории симметрии кристаллов. Энергия M в. записывается в виде разложения по инвариантным полиномам, составленным из компонентов тензора упругих деформаций среды e_{ij} и компонентов многомерного параметра порядка, характеризующего *магнитную атомную структуру* среды. В ферромагнетике (ФМ) в качестве параметра порядка используют намагнитченность M , в антиферромагнетике (АФМ) — векторы антиферромагнетизма и намагнитченности, в ферримагнетиках (ФИМ) — намагнитченности *магнитных подрешёток* и т. д. Энергия M в. является чётной ф-цией магн. параметров порядка, откуда следует симметрия относительно инверсии времени (см. *Магнитная симметрия*).

Для ФМ в линейном приближении по e_{ij} и квадратичном по компонентам намагнитченности энергия M в. может быть представлена в виде

$$\mathcal{E}_{MB} = b_{ijkl} e_{ij} \alpha_k \alpha_l, \quad (1)$$

где b_{ijkl} — тензор магнитоупругих постоянных, α_i — направляющие косинусы вектора намагнитченности. В ф-ле (1) и далее суммирование осуществляется по дважды встречающимся индексам. Тензор четвёртого