

длин волн $\sqrt{2\pi A/M_s^2} \ll \lambda \ll 2\pi c/\omega\sqrt{\epsilon}$, где A – параметр обменного взаимодействия, M_s – намагниченность насыщения, ϵ – диэлектрич. проницаемость среды, c – скорость света, ω – собственная частота магнитоэлектрических волн.

Для описания свойств М. в. используют уравнение Ландау – Лифшица, в которое входит $\mathbf{H}^{(м)}$ и постоянное стороннее магнитное поле напряжённостью $\mathbf{H}$:

$$\dot{\mathbf{M}} = -\gamma[\mathbf{M}, \mathbf{H} + \mathbf{H}^{(м)}]$$

(γ – магнитомеханическое отношение), и уравнения магнитоэлектрики (при отсутствии сторонних токов):

$$\text{rot } \mathbf{H}^{(м)} = 0, \quad \text{div } \mathbf{H}^{(м)} = 4\pi\rho_m,$$

где $\rho_m = -\text{div } \mathbf{M}$ – плотность объёмных магнитоэлектрич. «зарядов» (по аналогии с электростатикой). В ограниченных средах на границах учитывают также непрерывность тангенциальной и нормальной к поверхности образца составляющих напряжённости $\mathbf{H}^{(м)}$ и индукции магнитного поля $\mathbf{B} = \mathbf{H}^{(м)} + 4\pi\mathbf{M}$ соответственно. Этим учитываются поверхностные «заряды» $\sigma_m = -n\mathbf{M}$, где n – единичный вектор нормали к поверхности раздела. Т. о., поля, обуславливающие свойства М. в., отличны от нуля только при $\rho_m \neq 0$ и $\sigma_m \neq 0$.

В безграничной среде закон дисперсии М. в. (зависимость частоты ω от волнового вектора $\mathbf{k}$) не зависит от $\mathbf{k}$, а зависит только от угла между векторами $\mathbf{M}$ и $\mathbf{k}$. Частоты этих волн лежат в диапазоне $\omega_H \leq \omega \leq \sqrt{\omega_H(\omega_H + \omega_M)}$, где $\omega_H = \gamma H$, $\omega_M = \gamma 4\pi M_s$.

В плёнках (пластинах) в зависимости от взаимной ориентации векторов $\mathbf{k}$ и $\mathbf{H}$ существуют поверхностные и внутриобъёмные М. в. Последние подразделяются на прямые внутриобъёмные и обратные внутриобъёмные М. в. Все М. в. распространяются вдоль поверхности плёнки. Прямые внутриобъёмные М. в. возникают при $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n}$ и существуют в диапазоне частот $\Omega_H < \omega < \Omega_{1H} = \sqrt{\Omega_H^2 + \Omega_H\Omega_M}$, где $\Omega_H = \omega_H - \omega_M$; их собств. частоты растут с ростом k , так что их групповая скорость $d\omega/dk > 0$. Обратные внутриобъёмные М. в. возникают при $\mathbf{H} \perp \mathbf{n}$ и существуют в диапазоне частот $\omega_H \leq \omega \leq \omega_{1H} = \sqrt{\omega_H^2 + \omega_H\omega_M}$; их собств. частоты уменьшаются с увеличением k и групповая скорость отрицательна. Поверхностные М. в. (т. н. волны Деймона и Эшбаха) существуют в касательно намагниченной плёнке в области частот $\omega_{1H} \leq \omega \leq \omega_{2H} = \omega_H + 1/2$.

М. в. возникают также в магнитоупорядоченных стержнях, а магнитоэлектрич. колебания (т. н. моды Уокера) – в малых частицах.

М. в. могут взаимодействовать со спиновыми и звуковыми волнами. Затухание М. в. зависит от конкретных свойств магнитных материалов. Наилучшими в этом отношении являются плёнки иттриевого феррита-граната, где затухание может

составлять 15–25 дБ/мкс. Для возбуждения и приёма М. в. применяют микрополосковые линии. М. в. перспективны для использования в устройствах обработки СВЧ-сигналов.

Лит.: Барьяхтар В. Г., Казанов М. И. Неоднородный резонанс и спиновые волны // Ферромагнитный резонанс / Под ред. С. В. Вонсовского. М., 1961; Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М., 1994.

Б. Н. Филиппов.

МАГНИТОСТРАТИГРАФИЯ, раздел палеомагнитологии, изучающий временную последовательность *инверсий геомагнитного поля* в толщах осадочных и вулканич. пород с целью расчленения геологич. разрезов и их возрастной корреляции. М. исследует гл. обр. естеств. намагниченность *остаточную*, вектор которой представляет собой своеобразный отпечаток магнитного поля геологич. прошлого в горных породах. Изучение естеств. остаточной намагниченности горных пород, закреплённой в магнитных (магнитоупорядоченных) минералах, даёт возможность восстановить историю инверсий геомагнитного поля, создать шкалу полярности геомагнитного поля (магнитохронологич. шкалу). Построение этой геомагнитной шкалы времени возможно несколькими методами, причём выбор метода определяется необходимой степенью детальности, полнотой последовательности, возможностями датировки инверсий. Один из методов основан на магнито-стратиграфич. изучении пород геологич. разрезов, колонок кернов, извлечённых из скважин, или отложений, поднятых со дна озёр, морей и океанов. По направлению естеств. остаточной намагниченности в изучаемых разрезах отложений выделяются интервалы (магнитозоны) прямой геомагнитной полярности (положение сев. палеомагнитного полюса совпадает с совр. положением) и обратной полярности (положение сев. палеомагнитного полюса противоположно современному), относительно геологич. возраста которых устанавливается биостратиграфич. методом (см. *Биостратиграфия*). Затем производится палеомагнитная и биостратиграфич. корреляция локальных разрезов и составляются региональные магнито-стратиграфич. шкалы (относительного геологич. возраста), которые, в свою очередь, сводятся в общую магнито-стратиграфич. шкалу. Расчленение и сопоставление последовательностей отложений, построение магнито-стратиграфич. шкалы также производят на основании изучения вариаций палеонапряжённости геомагнитного поля, скалярных магнитных характеристик пород (применяют только для детальной местной корреляции, распознавания магнитозон). При обобщении магнито-стратиграфич. и геохронологич. данных (о возрасте стратиграфич. подразделений в годах) составляют шкалу геомагнитной полярности (магнитохронологич. шкалу).

В основе др. метода построения магнитохронологич. шкалы лежит установление возраста горных пород (в годах),

для которых определена геомагнитная полярность, на основе физических, напр. изотопных, методов (см. в ст. *Геологический возраст*). Магнитохронологич. шкала для последних 170 млн. лет была также построена в процессе изучения *линейных магнитных аномалий* в океане с использованием данных о скорости *спрединга* (раздвига и наращивания океанич. коры на гребнях срединно-океанич. хребтов).

Совр. магнитохроностратиграфич. шкала фанерозоя (для последних примерно 540 млн. лет) включает не менее 640 смен полярности геомагнитного поля. Время между соседними сменами полярности варьирует от менее 10 тыс. лет до св. 20 млн. лет; распределение их во времени носит скорее хаотич. характер. Подразделениями шкалы являются (от наиболее мелких к наиболее крупным): микрохроны, субхроны, хроны, суперхроны (продолжительность от 6 до 29 млн. лет, средняя – 15 млн. лет) и гиперхроны (продолжительность от 19 до 74 млн. лет, средняя – 37 млн. лет). Только микрохроны и, отчасти, субхроны представлены интервалами времени одной геомагнитной полярности; остальные единицы состоят из интервалов одной или обеих полярностей. Для более точного построения магнитохроностратиграфич. шкалы используют кумулятивную кривую суммарной продолжительности интервалов прямой и обратной полярности с учётом знака, т. е. их алгебраич. суммы.

Магнито-стратиграфич. метод расчленения и корреляции геологич. разрезов предложен рос. учёным А. Н. Храмовым в 1950-х гг. и широко применялся палеомагнитологами СССР, позднее получил мировое признание. В 1976 группа отеч. исследователей (Э. А. Молостовский и др.) разработала макет магнито-стратиграфич. шкалы фанерозоя, которая впоследствии уточнялась и дополнялась в России (А. Н. Храмов, В. К. Шкатова, Э. А. Молостовский и др.) и за рубежом (брит. исследователи Ф. Градштейн, Н. Опдайк, Дж. Чаннелл и др.).

Лит.: Храмов А. Н. Палеомагнитная корреляция осадочных толщ. Л., 1958; *Opdyke N. D., Channell J. E. T. Magnetic stratigraphy*. San Diego, 1996; Храмов А. Н., Шкатова В. К. Общая магнито-стратиграфическая шкала полярности фанерозоя // Дополнения к Стратиграфическому кодексу России. СПб., 2000; *A geological time scale / Ed. F. M. Gradstein, J. G. Ogg, A. G. Smith. 3rd ed. Camb.; N. Y., 2004; Молостовский Э. А., Печерский Д. М., Фролов И. Ю. Магнито-стратиграфическая шкала фанерозоя и ее описание с помощью кумулятивной функции распределения // Физика Земли. 2007. № 10.*

Д. М. Печерский.

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, материалы, обладающие хорошо выраженными магнито-стрикционными свойствами (см. *Магнито-стрикция*). К традиционным М. м. относятся: никель, сплавы Fe – Al (*алфер*), Fe – Ni (*пермаллой*), Co – Ni, Fe – Co, Co – Fe – V

(пермендюр) и др.; ряд ферритов (CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 и др.). Никель обладает хорошими магнитоэлектрическими, механич. и антикоррозионными свойствами; пермендюр имеет большие значения магнитоэлектрической насыщенности и намагниченности; ферриты обладают высокими удельным электрич. сопротивлением и коррозионной стойкостью; кроме того, эти М. м. самые дешёвые. Однако малые величины магнитоэлектрических таких М. м. заметно сдерживают их широкое применение в технике. Поэтому очень важным стало обнаружение нового класса редкоземельных интерметаллич. соединений ReFe_2 ($\text{Re} = \text{PЗЭ}$) с магнитоэлектрической насыщенностью порядка $2 \cdot 10^{-3}$ при комнатной темп-ре.

Исследование соединений тербий – диспрозий – железо привело к открытию соединения терфенол-Д (на основе состава $\text{Tb}_{0,27}\text{Dy}_{0,73}\text{Fe}_2$ со структурой фазы Лавеса), которое наиболее перспективно из-за гигантской магнитоэлектрической (10^{-2}) при комнатной темп-ре и малой величины магнитоэлектрич. анизотропии, что позволяет применять его в относительно слабых магнитных полях. Ныне этот материал применяют в гидролокаторах и магнитоэлектрических силовых приводах. Вследствие потерь на вихревые токи и небольшой долговечности применение терфенола-Д ограничено частотным диапазоном 2 кГц. Использование полимерных композитов на основе терфенола-Д позволило существенно снизить потери за счёт вихревых токов в диапазоне частот до 100 кГц и выше, а также улучшить их рабочие свойства за счёт повышения эластичности и стойкости к сдвиговым деформациям. В нач. 21 в. исследован сплав железа и галлия (галфенол). Данный М. м. обладает приблизительно в 3 раза меньшим значением магнитоэлектрической, чем терфенол-Д, но более вязок и может быть подвергнут механич. обработке и использован в условиях, при которых терфенол-Д разрушается.

К новым М. м. относятся магнитные сплавы с эффектом памяти формы. Сплавы, близкие к стехиометрии сплавов Гейслера Ni_2MnGa , могут проявлять деформации до 6–10% в слабых магнитных полях в течение более чем 10^6 циклов без разрушения материала. Гигантский магнитоэлектрический эффект наблюдается в высокотемпературных сверхпроводниках и в материалах с колоссальным магнитоэлектрическим сопротивлением. К последним относятся оксиды марганца со структурой перовскита $\text{Re}_{1-x}\text{Me}_x\text{MnO}_3$, где $\text{Re} = \text{PЗЭ}$, $\text{Me} = \text{Ca}$, Sr , Pb и Ba . Магнитоэлектрические материалы этой группы сильно анизотропны.

Гигантские величины магнитоэлектрической были обнаружены в наноразмерных магнитных мультислоях (наноразмерных тонких плёнках, мультислоях и сверхрешётках), а также в нанокристаллич. сплавах (наноразмерные магнитные частицы, введённые в аморфную матрицу). Подобные материалы проявляют необычные для объёмных материалов магнит-

ные свойства, в частности поверхностную магнитоэлектрическую деформацию. Для довольно сложных измерений магнитоэлектрических свойств наноразмерных плёнок и мультислоев был разработан ряд спец. эксперим. методик, напр. магнитоэластический кантилевер, а также деформационно-модулированный ферромагнитный резонанс; магнитоэлектрические свойства также определяются из данных по деформационной анизотропии. Одним из результатов таких измерений стало открытие зависимости магнитоэлектрической от толщины слоя. Недавние исследования показали, что мультислои TbCo/FeCo и TbFe/Fe обладают гигантскими величинами магнитоэлектрической, большими, чем у терфенола. Возможное объяснение этого явления связано с тем, что данные композиционные материалы состоят из двух частей, одна из которых обладает большой магнитоэлектрической, а другая является магнитомягкой и обладает большими значениями намагниченности.

М. м. применяют в качестве преобразователей электромагнитной энергии в др. виды, напр. в механическую или акустическую (см. *Магнитоэлектрический преобразователь*). Устройства на основе М. м. могут работать при более высоких темп-рах, чем пьезоэлектрич. и электроэлектрические устройства, проявляя большие деформации при более низком входном напряжении. Они используются для изготовления датчиков давления и бесконтактных датчиков перемещений, управляющих устройств (высокоточной обработки линз и материалов, хирургич. инструментов, контроля шума и т. п.), фильтров, стабилизаторов частоты в радиотехнике, линий задержки в акустике, источников звука (ультразвука) и вибраций, а также устройств контроля вибраций.

Лит.: Clark A.E. Magnetostrictive rare earth-Fe₂ compounds // Ferromagnetic materials: a handbook on the properties of magnetically ordered substances / Ed. E. P. Wohlfarth. Amst.; N. Y., 1980; Белов К. П. Магнитоэлектрические явления и их технические приложения. М., 1987; Handbook of giant magnetostrictive materials. San Diego, 2000; Васильев А. Н. и др. Ферромагнетизм с памятью формы // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 6; Moral A. del. Magnetostriction: basic principles and materials. [L.], 2009. В. И. Зверев, А. М. Тишин.

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, электроакустич. или электроакустич. преобразователь, в котором энергия переменного магнитного поля преобразуется в энергию механич. колебаний и наоборот благодаря эффекту *магнитоэлектрической*. Применяется преим. на частотах 10–100 кГц как излучатель или приёмник ультразвука, а также для измерений вибраций конструкций и сооружений, в фильтрах и стабилизаторах электро- и радиотехнич. устройств. Конструктивно представляет собой сердечник (преобразующий элемент) из магнитоэлектрического материала (никель, ферриты, пермаллой, алфер и др.) с элек-

тромагнитной обмоткой. Относит. удлинение сердечника $\Delta l/l$ при намагничивании достигает 10^{-3} – 10^{-8} (l – длина сердечника). М. п. ультразвуковых установок чаще всего имеют сердечник в виде стержня (пакета пластин толщиной 0,1–0,2 мм); акустич. колебания излучаются или принимаются торцевыми поверхностями сердечника.

МАГНИТОСТРИКЦИЯ (от *магнит* и лат. *strictio* – сжатие), изменение формы и размеров тела при изменении его магнитного состояния, напр. в результате намагничивания или фазового перехода. Явление М. открыто Дж. Джоулем в 1842. Появление спонтанной намагниченности при охлаждении ферромагнетика или ферримангнетика ниже *Кюри точки* сопровождается появлением спонтанных деформаций кристаллич. решётки (спонтанная М.). В более общем смысле под М. понимают любые искажения кристаллич. решётки, связанные с изменением магнитного состояния вещества.

Могут происходить как изменения δl линейных размеров l образца в к.-л. направлении (линейная М., характеризуется величиной $\delta l/l$), так и изменения δV объёма V образца (объёмная М., описывается величиной $\delta V/V$). Различают также продольную и поперечную линейные М. (изменение линейных размеров образца вдоль и поперёк намагничивающего поля H). Величина $\delta l/l$ мала и в зависимости от конкретного вещества изменяется в пределах 10^{-6} – 10^{-2} . Несмотря на это, она играет существенную роль как в образовании *магнитных доменных структур* и формировании магнитных свойств вещества, так и во многих технич. приложениях (магнитоэлектрические излучатели и приёмники УЗ-волн, линии задержки, фильтры частоты в радиотехнич. устройствах и т. п.).

Наибольшая М. наблюдается в редкоземельных металлах, а также их сплавах и соединениях, напр. в TbFe_2 и DyFe_2 $\delta l/l \approx 10^{-3}$ – 10^{-2} (в зависимости от величины H). Очень маленькая М. в антиферромагнетиках; М. практически отсутствует в парамагнетиках и диамагнетиках.

Спонтанная М. зависит от величины и направления намагниченности M магнетика, но не меняется при замене M на $-M$ (чётный эффект). Различают изотропную и анизотропную части М. В кубич. кристаллах анизотропная часть М. приближённо может быть охарактеризована двумя константами λ_{100} , λ_{111} (относит. растяжения кристалла в направлениях $[100]$ и $[111]$ при намагничивании в тех же направлениях). Константы λ_{100} , λ_{111} могут быть как положительными, так и отрицательными (табл.). Знак и величина М. зависят от состава вещества, темп-ры, кристаллографич. текстуры, примесей, термообработки и др.

При наличии магнитной доменной структуры при $H = 0$ средняя по образцу М. может оказаться равной нулю. Если, исходя из такого состояния, увеличивать H , М. будет изменяться, описывая