

1. Для кристаллов без магнитной структуры  $m(x, y, z) = 0$ , группа магнитной симметрии  $\bar{G}$  содержит операцию  $R$  и является прямым произведением пространственной (см. *Фёдоровские группы*) группы  $G$  на группу, состоящую из операции  $R$  и тождественной операции  $\bar{G} = G + RG$  (серые группы).

2. Белые группы вообще не содержат операции  $R$  и совпадают с фёдоровскими группами.

3. Чёрно-белые группы содержат операцию  $R$  только в комбинациях  $g = Rg$  с пространственными преобразованиями  $g$ , отличными от тождественного преобразования. Наиболее простой вывод чёрно-белых групп состоит в следующем: берётся фёдоровская группа  $G$  и её вещественное неединичное одномерное неприводимое представление; те элементы  $g \in G$ , для к-рых характеры  $\chi(g) = 1$ , входят в шубниковскую группу  $\bar{G}$  непосредственно, а те, для к-рых  $\chi(g) = -1$ , — в комбинации  $Rg$ . Перебирая все фёдоровские группы и их одномерные вещественные неединичные неприводимые представления, получаем все чёрно-белые шубниковские группы.

Всего имеется 1651 магнитная (шубниковская) пространственная группа, из них 230 серых, столько же белых и 1191 чёрно-белая. Для анализа макроскопических свойств достаточно ограничиться точечной симметрией. Всего имеется 122 кристаллографических магнитных класса (точечные группы), из них 32 серых, 32 белых и 58 чёрно-белых.

Среди макроскопических магнитных свойств особое место занимает намагниченность  $M$ . Любой магнитный класс, допускающий намагниченность, есть подгруппа группы симметрии магнитного момента  $m \cdot \infty : m$  (обозначения по Шубникову), состоящей из  $\infty$  бесконечного порядка  $\infty$  (вдоль  $M$ ), перпендикулярной ей плоскости симметрии  $m$ , а также бесконечного числа проходящих через ось  $\infty$  антиплоскостей симметрии  $\bar{m}$  (т. е. плоскостей отражения с одновременным обращением времени) и перпендикулярных оси  $\infty$  антиосей второго порядка  $2$ .

Магнитное упорядочение возникает вследствие взаимодействия, зависящих от магнитного момента. Если пренебречь слабыми релятивистскими взаимодействиями, то остаётся обменное взаимодействие, зависящее от взаимной ориентации спинов и не зависящее от ориентации спинов относительно решётки. Поэтому кроме приведённого точного описания  $M$  с. для классификации магнитных структур используется обменная симметрия (ОС). Группа ОС связана с группой  $G$  симметрии плотности заряда соотношением

$$G_{ex} = G \times U,$$

где  $U$  — группа вращений в спиновом пространстве.

Поскольку в ОС ориентация спинов относительно решётки условна, можно считать, что под действием  $g \in G$  спины ведут себя как скаляры и  $m(r)$  переходит в  $m(gr)$ . Действуя на  $m(r)$  различными  $g \in G$ , получаем представление группы  $G$ . Разлагая это представление на неприводимые, получаем

$$m(r) = \sum_{\alpha} m_{\alpha}^n \varphi_{\alpha}^n(r), \quad (1)$$

где  $n$  — номер представления,  $\varphi_{\alpha}^n$  — базисные функции представления. Функция  $m^2(r)$  является спиновым инвариантом, поэтому она инвариантна относительно  $G$  и

$$m_{\alpha}^n \cdot m_{\beta}^n = C_{n\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta}. \quad (2)$$

Максимальное число взаимно перпендикулярных компонент магн. момента равно 3, поэтому суммарная размерность представлений, входящих в разложение (1), не превышает трёх.

Классификация магнитных структур в ОС проводится перебором различных представлений фёдоровских групп. Если разложение (1) содержит только единичное представление, то имеется ферромагнитная структура,

если не содержит единичного представления, — антиферромагнитная, в остальных случаях — ферримагнитная структура.

Если представить различные значения спина различными цветами, то ОС сводится к цветной симметрии ( $P$ -симметрия).

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; Копчик В. А., Шубниковские группы, М., 1966; Андреев А. Ф., Марченко В. И., ЖЭТФ, 1976, т. 70, с. 1522; Заморзаев А. М., Галарский Э. И., Палистрат А. Ф., Цветная симметрия, ее обобщения и приложения, Кипинев, 1978; Изюмов Ю. А., Найш В. Е., Озеров Р. П., Нейтрография магнетиков, М., 1981. Е. Б. Логинов.

**МАГНИТНАЯ ТЕКСТУРА** — преимуществ. ориентация осей лёгкого намагничивания в поликристаллич. ферро- или ферримагнитном материале. Наличие  $M$  т. приводит к анизотропии магн. свойств материала (см. *Магнитная анизотропия*). При ориентации векторов  $M_s$  силовой намагниченности магн. доменов вдоль выделенной оси  $M$  т. наз. осевой (продольной), при их ориентации перпендикулярно этой оси — поперечной.

$M$  т. может быть получена разл. способами. Наиб. часто  $M$  т. является следствием кристаллографич. текстуры, т. е. преимуществ. ориентации отд. зёрен в поликристаллах, возникающей при кристаллизации, пластич. деформации, рекристаллизации или фазовых превращениях. Кристаллографич. текстура в порошковых магн. материалах создаётся в результате прессования изделий в магн. поле.

Распространённым способом создания  $M$  т. является термомагн. или термомеханич. обработка. В первом случае термич. обработка производится в магн. поле, во втором — под растягивающей или сжимающей нагрузкой.  $M$  т. может возникать и за счёт придания образцам к.-л. характерной формы (удлинённой, уплощённой и др.).

Осевая  $M$  т. широко используется для улучшения свойств магн. материалов. В *магнитно-мягких материалах* вдоль направления оси  $M$  т. облегчаются процессы *перемагничивания*, поскольку в этих материалах преобладают 180-градусные *доменные стенки*, требующие для своего смещения минимальных затрат энергии. По этой же причине при перемагничивании вдоль оси  $M$  т. наблюдаются высокие значения *магнитной проницаемости*, низкие значения *коэрцитивной силы* и потерь на гистерезис. Для *магнитно-твёрдых материалов* важное значение имеет *намагниченность остаточная*  $M_r$ , достигающая наиб. значения вдоль оси  $M$  т. В большинстве магнитно-твёрдых материалов коэрцитивная сила  $H_c$  вдоль оси  $M$  т. превышает её значения в др. направлениях. Последнее связано с тем, что значения  $H_c$  таких материалов определяются необратимостью процессов вращения векторов  $M_s$  или задержкой возникновения зародышей перемагничивания.

Материалы с  $M$  т. относятся к *анизотропным* материалам. Среди магнитно-мягких материалов с  $M$  т. наиб. распространены: холоднокатаная электротехнич. сталь (после прокатки обладающая кристаллографич. текстурой), сплавы пермаллой и пермилвар (после термомагн. обработки). К магнитно-твёрдым материалам с  $M$  т. относятся сплавы титана аликко (ЮНДК), титанал (ЮНДКТ), викаллоу, сплавы Fe—Co—Cr, бариевый и кобальтовый *ферриты*, материалы на основе *интерметаллических соединений* редкоземельных элементов. Иногда для получения макс.  $M$  т. сочетают создание кристаллографич. текстуры с термомагн. обработкой (напр., в сплавах аликко и титанал).  $M$  т. может существовать и в *аморфных магнетиках* за счёт локальной анизотропии *внутрикристаллического поля* и неоднородностей, вызванных технологич. причинами.

Лит.: Преображенский А. А., Бишард Е. Г., Магнитные материалы и элементы, 3 изд., М., 1986; Вонсовский И. С. В., Магнетизм, М., 1971. А. С. Ермоленко.

**МАГНИТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ** — метод измерения низких температур, основанный на существовании