

Обменная $s-d(f)$ -модель позволяет также установить связь между электронами проводимости РЗМ-металлов и особенностями их атомной магн. структуры, к-рая имеет вид неколлинеарных винтовых структур. Эта модель, если её дополнить учётом магн. (спин-орбитального) взаимодействия, позволяет также объяснить в принципе все аномалии электронных свойств ферромагнетиков, связанных с существованием в них спонтанной намагниченности. Учёт магн. (релятивистских) взаимодействий позволяет объяснить природу магн. анизотропии и магнитострикции. Ещё в 1947 Ж. М. Латтинжер и Л. Тисса [12] высказали гипотезу о возможности существования «дипольного ферромагнетизма» в системе свободно вращающихся магн. диполей даже в отсутствие обменного взаимодействия или при весьма слабом обменном взаимодействии. Экспериментально такой Ф. обнаружен в 1990 [13] в образце ГЦК-структуры РЗМ-соли $Cs_2NaR(NO_2)_6$ (где $R=Dy, Er, Gd, Nd$), в к-рой магн. ионы находятся на достаточно удалённом расстоянии и поэтому обменная связь (~ 10 мК) на порядок меньше дипольной энергии (~ 100 мК), а точки Кюри расположены в интервале $60 \div 6,5$ К.

Теория кривой намагничивания ферромагнетиков. Из опыта известно, что при $H=0$ термодинамическому устойчивому состоянию макрообразца (минимуму термодинамич. потенциала) отвечает размагниченное состояние, ибо в противном случае на поверхности образца, как правило, образуются магн. полюса, создающие размагничивающее поле H_{Σ} , с к-рым связана большая положит. энергия. Т. о., возникает тенденция размагничивания конечных образцов, хотя обменные силы стремятся их «намагнитить». В результате происходит разбиение ферромагн. образца на макрообласти однородной намагниченности. Эту гипотезу высказал ещё в 1907 П. Вейс (P. Weiss), а количественно обосновали впервые в 1935 Л. Ландау и Е. Лифшиц (см. *Ферромагнитные домены и Магнитная доменная структура*). Теория Ф. качественно определяет размеры и форму доменов, к-рые зависят от конкуренции разл. взаимодействий внутри ферромагнетика. Равновесная структура доменов при $H=0$ имеет вид совокупности связанных замкнутых магн. потоков внутри образца. Наряду с осн. доменами могут возникать и вторичные, т. н. замыкающие, домены. Магн. доменная структура является весьма структурно чувствительной. Между доменами образуются промежуточные слои, или стенки (см. *Доменная стенка, Блоха стенка, Нееля стенка*), конечной толщины, в к-рых вектор M_x непрерывно меняет своё направление от ориентации, отвечающей вектору M_x в одном домене, до ориентации, отвечающей направлению M_x его соседа. На образование этих стенок затрачивается положит. энергия, но её величина по всему образцу меньше энергии поля H_{Σ} , к-рая возникла бы в отсутствие доменов. При нек-рых критически малых размерах ферромагн. образцов возникновение в них неск. доменов может стать энергетически невыгодным, тогда частицы остаются при $T < T_C$ однородно намагниченными (см. *Однородные частицы*). Этим объясняются особые свойства тонких ферромагн. порошков и изделий из них (см. *Магнитно-твёрдые материалы*). Среди них получили довольно широкое распространение коллоидные растворы однодоменных ферромагн. частиц, образующих магн. жидкости, имеющие перспективные области применения в технике и медицине. Весьма специфич. характер носит ферромагн. доменная структура в тонкой *магнитной плёнке* (см. также *Цилиндрические магнитные домены*). Кривые намагничивания и петли гистерезиса в ферромагнетиках, т. е. все процессы перемагничивания, определяются, в первую очередь, изменениями доменной структуры во внеш. магн. поле H , т. е. путём изменения объёма доменов с разл. ориентацией векторов M_x , в них за счёт смещения границ доменов (см. *Доменная стенка динамика, Доменопроводящая структура*). Кроме того, играет роль и вращение векторов M_x в направлении внеш. поля. В размагниченном состоянии (с точностью до объёма, занятого доменными стенками) имеем $\sum_i M_x^i v_i \cos \theta_i = 0$, где суммирование идёт по всем i -м доме-

нам: v_i — объём i -го домена; θ_i — угол между вектором M_x^i в i -м домене и любой фиксир. осью в образце, напр. совпадающей с ориентацией намагничивающего поля. При включении поля вдоль этой оси в направлении поля появляется отличная от нуля намагниченность:

$$\delta M_n = M_x \sum_i \cos \theta_i \delta v_i + M_x \sum_i v_i \delta (\cos \theta_i). \quad (11)$$

Первое слагаемое в (11) обусловлено ростом объёмов доменов, M_x в к-рых направлены относительно H энергетически более выгодно, за счёт объёмов доменов, намагниченных менее выгодно; всё это осуществляется путём процессов смещения доменных стенок. Второе слагаемое в (11) обусловлено процессами вращения векторов M_x . Уд. магн. восприимчивость ферромагнетиков, т. о., приближённо равна сумме $\chi = \chi_{\text{смещ}} + \chi_{\text{вращ}}$. Анализ реальных кривых показывает, что в слабых полях $\chi_{\text{смещ}} \gg \chi_{\text{вращ}}$, а в более сильных (после круглого подъёма кривой) $\chi_{\text{вращ}} \gg \chi_{\text{смещ}}$. При размагничивании ферромагнетика из состояния магн. насыщения происходит восстановление доменной структуры путём возникновения зародышей перемагничивания — областей с обратной (по отношению к первоначальной) намагниченностью. В Дёрингом (W. Döring) в 1939 была разработана достаточно строгая и общая теория роста таких зародышей, к-рая хорошо подтверждена экспериментально [9, 4].

Из-за структурной чувствительности доменной структуры и процессов намагничивания и перемагничивания количеств. теория кривых намагничивания и петель гистерезиса ферромагнетиков находится в нач. стадии развития. Лишь в случае расчёта кривых намагничивания идеальных монокристаллов определ. формы в области, где $\chi_{\text{вращ}} \gg \chi_{\text{смещ}}$ [1], можно развить строгую количеств. теорию изобразов простоты формы (напр., эллипсоидов), допускающей однородность намагниченности при их структурной и хим. однородности. Теория кривых намагничивания и петель гистерезиса имеет важное значение для разработки новых и улучшения существующих *магнитных материалов*, играющих весьма важную и всё возрастающую роль в совр. технике (напр., в магн. дефектоскопии и структурном анализе, а также при конструировании элементов памяти ЭВМ, ускорительных секций, накопительных колец и т. п.).

Лит.: 1) Акулов Н. С., Ферромагнетизм, М.—Л., 1939; 2) Бозорт Р., Ферромагнетизм, пер. с англ., М., 1956; 3) Вонсовский С. В., Шур Я. С., Ферромагнетизм, М.—Л., 1948; 4) Вонсовский С. В., Магнетизм, М., 1971; 5) Дорфман Я. Г., Магнитные свойства и строение вещества, М., 1955; 6) Туров Е. А., Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов, М., 1963; 7) Вонсовский С. В., Изюмов Ю. А., Электронная теория переходных металлов, «УФН», 1962, т. 77, в. 3, с. 377; 1962, т. 78, в. 1, с. 3; 8) Теория ферромагнетизма металлов и сплавов. Сб. ст., пер. с англ., М., 1963; 9) Becker R., Döring W., Ferromagnetismus, В., 1939; 10) Kneller E., Ferromagnetismus, В.—[u. a.], 1962; 11) Magnetism, A treatise on modern theory and materials, ed. by G. T. Rado, H. Suhl, v. 1. Magnetic ions in insulators, their interactions, resonances and optical properties, N. Y.—L., 1963; v. 2A. Statistical models, magnetic symmetry, hyperfine interactions and metals, N. Y.—L., 1965; v. 2B. Interactions and metals, N. Y.—L., 1966; v. 3. Spin arrangements and crystal structure, domains and micromagnetics, N. Y.—L., 1963; v. 4; Herring C. (сост.), Exchange interactions among itinerant electrons, N. Y.—L., 1966; 12) Luttinger J. M., Tisza L., Theory of dipole interaction in crystals, «Phys. Rev.», 1946, v. 70, p. 954; 1947, v. 72, p. 257; 13) Roser M. R., Corruccini L. R., Dipolar ferromagnetic order in a cubic system, «Phys. Rev. Lett.», 1990, v. 65, p. 1064; 14) Тябликов С. В., Методы квантовой теории магнетизма, 2 изд., М., 1975; 15) Нагаев Э. Л., Физика магнитных полупроводников, М., 1979; 16) Уайт Р., Квантовая теория магнетизма, пер. с англ., 2 изд., М., 1985; 17) Тикадзуми С., Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества, пер. с япон., М., 1983; 18) Никитин С. А., Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов, М., 1989; 19) Куркин М. И., Туров Е. А., ЯМР в магнитоупорядоченных веществах и его применения, М., 1990; 20) Тикадзуми С., Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения, пер. с япон., М., 1987; 21) Изюмов Ю. А., Скрябин Ю. Н., Статистическая механика магнитоупорядоченных систем, М., 1987; 22) Мория Т., Спиновые флуктуации в магнетиках с коллективизированными электронами, пер. с англ., М., 1988; 23) Анисимов В. И. и др., Зонная теория