

тивления, магнетосопротивления и т. п. В большом числе металлических, оксидных и др. Т. р. реализуется сверхпроводимость, почти все они являются сверхпроводниками 2-го рода.

В разбавленных Т. р. переходных и редкоземельных металлов (Mn, Fe, Cr, Co, Y и др.) в Au, Ag, Cu при низких темп-рах наблюдается минимум на зависимостях $\rho(T)$, обусловленный косвенным обменным взаимодействием между спинами примесных атомов через электроны проводимости Au, Ag, Cu.

Взаимодействие спинов хаотически распределённых магн. атомов приводит к образованию состояния, называемого *спиновым стеклом*. Для спиновых стёкол характерны отсутствие спонтанной намагниченности, максимум

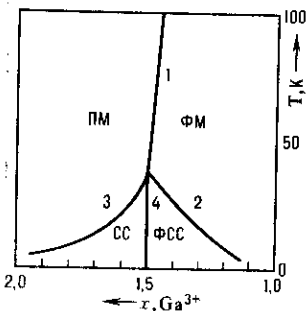


Рис. 3. Диаграмма магнитных состояний твёрдых растворов замещения в системе $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Ga}_x\text{O}_4$ ($1,5 < x < 2,0$): 1—линия точек Кюри (T_c); 2, 3—линии T_f ; 4—линия фазовых переходов спиновое стекло—ферримагнитное спиновое стекло.

магн. восприимчивости при темп-ре замерзания T_f , магнитная вязкость (аномально большое время установления магн. равновесия), линейная зависимость теплоёмкости от темп-ры при $T \ll T_f$. В состоянии спинового стекла могут находиться не только металлические, но и диэлектрические Т. р. На рис. 3 представлена магн. x — T -диаграмма состояния системы ферримагн. оксидов $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Ga}_x\text{O}_4$, на к-рой в широком диапазоне концентраций (x) и темп-р реализуются области существования парамагнитного (ПМ), ферримагнитного (ФМ) состояния, а также области существования спинового стекла (СС) и ферримагн. спинового стекла (ФСС). В Т. р. реализуются ферро-, антиферро- и ферримагн. состояния с разл. магн. структурами; макроскопич. магн. свойства Т. р. изменяются в широких пределах.

Свойства Т. р. на основе соств. *полупроводников* чувствительны к характеру и концентрации примесей замещения. При введении примесей с валентностью, большей валентности осн. атомов решётки (доноров), концентрация электронов превышает концентрацию дырок и полупроводник имеет проводимость n -типа (напр., Т. р. As в Ge). В противоположном случае введения акцепторов полупроводник имеет проводимость p -типа (Т. р. Al в Si).

Отличие механич. свойств Т. р. от свойств чистых металлов заключается в повышении прочности в результате изменения дислокационной структуры и включения разл. механизмов взаимодействия дислокаций с растворёнными атомами (см. *Дислокация*). Возможны 2 механизма взаимодействия дислокаций с примесными атомами: закрепление (блокирование) неподвижных дислокаций и возникновение трения при движении дислокаций. Изменение механич. свойств имеет место при отрыве движущихся дислокаций от атмосферы примесей (см. *Сплавы*). Наличие дальнего и ближнего порядка в Т. р. приводит к дополнит. упрочнению.

Лит.: Сивергсен Д. М., Никольсон М. Е., Структура и свойства твёрдых растворов, пер. с англ., М., 1964; Физическое материаловедение, пер. с англ., 3 изд., т. 1—3, М., 1987; Хачатурян А. Г., Теория фазовых превращений и структура твёрдых растворов, М., 1974; Исacroнова В. И., Кацнельсон А. А., Ближний порядок в твёрдых растворах, М., 1977; Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Физика металлов, М., 1978; Эренрейх Г., Шварц Л., Электронная структура сплавов, пер. с англ., М., 1979; Пасынков В. В., Сорокин В. С., Материалы электронной техники, 2 изд., М., 1986; Финкель В. А., Структура сверхпроводящих соединений, М., 1983; Ефимова Н. Н., Попков Ю. А., Ткаченко Н. В., Фазовый переход парамагнетик—

спиновое стекло в разбавленных ферримагнитных оксилах, «ЖЭТФ», 1990, т. 97, в. 4, с. 1208.

В. А. Финкель.

ТВЕРДЫЙ ГЕЛИЙ—см. *Гелий твёрдый*.

ТВИСТОР—прямая во вспомогательном комплексном трёхмерном проективном пространстве T , используемом для реализации *Минковского пространства-времени*. Понятие T введено Р. Пенроузом (R. Penrose) в кон. 1960-х гг. Многообразие всех комплексных прямых в T зависит от 4 комплексных параметров; точкам пространства Минковского отвечает нек-рое их подмножество (см. ниже), зависящее от четырёх вещественных параметров. Нетривиальным является привлечение комплексной геометрии (твисторного пространства) для работы с вещественным пространством-временем.

Множество всех прямых в T интерпретируется как комплексифицированное и (конформно) компактифицированное пространство Минковского. Оно представляет самостоят. интерес в связи с аналитич. продолжением тех или иных физ. величин, первоначально заданных на пространстве Минковского, в комплексную область (напр., в трубу будущего или прошлого). Евклидово четырёхмерие так же естественно реализуется, как нек-рое множество прямых в твисторном пространстве, в результате чего на твисторном языке удобно говорить о переходе от лоренцовых теорий к евклидовым (см. *Евклидова квантовая теория поля*). На языке прямых инвариантный геом. смысл имеет конформная структура на пространстве Минковского: точки находятся на нулевом расстоянии (их соединяет световой луч) тогда и только тогда, когда соответствующие им прямые в твисторном пространстве пересекаются.

Фундаментальная идея Пенроуза заключается в том, что первичной физ. структурой является не структура 4-мерного пространства-времени (Минковского), а комплексное твисторное трёхмерие T . Соответственно твисторные эквиваленты физ. величин должны допускать более простое описание, чем сами эти величины. По этой идеологии нек-рые физ. полевые ур-ния имеют чисто аналитич. природу: аналоги физ. величин, первоначально заданные как аналитич. объекты на трёхмерии (твисторах), путём какого-то варианта интегрирования по прямым переносятся на четырёхмерие M . При интегральном преобразовании аналитич. объектов от трёх комплексных переменных в аналитич. объекты от четырёх вещественных переменных должно возникать одно ур-ние на образ преобразования. На возможности такой интерпретации физ. полевых ур-ний и основана твисторная программа Пенроуза.

Простейшую реализацию твисторной программы дают ур-ния, описывающие безмассовые поля (в зависимости от спина это или скалярное волновое ур-ние, или система ур-ний Максвелла, или ур-ние Дирака—Вейля, или линеаризованное ур-ние Эйнштейна и т. д.). Безмассовым полям на твисторном пространстве отвечают решения нек-рых обобщений системы ур-ний Коши—Римана (δ -когомологии). Хотя этот матем. объект и не является элементарным, для его изучения имеется развитый аппарат в комплексном анализе, и возникает поучительный и нетривиальный пример применения комплексного анализа к изучению вещественных дифференц. ур-ний. Эти результаты носят скорее характер иллюстрации общей идеи Пенроуза, поскольку они не выходят за пределы новых представлений решений линеаризованных дифференц. ур-ний с постоянными коэффициентами.

Однако T оказались полезны при изучении нелинейных физ. ур-ний. Р. Уорд (R. Ward) и М. Атья (M. Atiyah) применили язык T к построению *инстантонов*—автодуальных решений ур-ния Янга—Миллса (см. *Янга—Миллса поля*). Инстантоны (решения ур-ния дуальности) рассматриваются на евклидовом четырёхмерии. На твисторном многообразии им отвечают комплексные векторные *расслоения*. Эта связь позволила, в конечном счёте, дать описание инстантонов [теорема Атья—Хитчина (N. Hitchin)—Дриффельда—Манина]. Язык T оказался удобен также для изучения др. класса решений ур-ния Янга—Миллса—*магнитных монополей*.