

Магнитоупругое взаимодействие

Магнитоупругое взаимодействие, взаимное влияние и связь между спиновой (магнитной) и решёточной (упругой) подсистемами магнитного материала. В магнитном материале выделяют решёточную, электронную и магнитную подсистемы, которые связаны между собой. Изменение в одной из них, как правило, приводит к изменениям и в других. Эти подсистемы не всегда можно чётко отделить одну от другой, а степень влияния одной подсистемы на другую определяется взаимодействием между ними.

Простейшими проявлениями магнитоупругого взаимодействия служат изменение размеров и формы магнитного материала при его намагничивании во внешнем магнитном поле (линейная и объёмная магнитострикция), а также изменение степени или даже типа магнитного упорядочения под действием внешних механических статических и/или динамических воздействий. Другие более нетривиальные проявления влияния упругой подсистемы на магнитную – изменение величины намагниченности, значений температур магнитных фазовых переходов и вида магнитных фазовых диаграмм (например, исчезновение или появление новых магнитных фаз), характера магнитного упорядочения и целого ряда других магнитных параметров. Эти изменения происходят под действием статических или динамических деформаций (например, за счёт воздействия гидростатического давления). Магнитоупругое взаимодействие может также приводить к заметным аномалиям упругих свойств магнитных материалов (например, упругих констант, модулей Юнга и внутреннего трения) в области температур магнитных фазовых переходов, а также приводить к изменению характера фазового перехода (например, к возникновению фазового перехода 1-го рода).

Основной причиной магнитоупругого взаимодействия является существенная зависимость величины взаимодействия магнитных моментов (диполь-дипольного взаимодействия, обменного взаимодействия, а также взаимодействия магнитных моментов с кристаллическим полем) от расстояний между ними. Степень взаимосвязи магнитного порядка и кристаллической решётки определяется интенсивностью магнитоупругого взаимодействия, которое в ряде случаев может даже приводить к комбинированным магнитно-структурным фазовым переходам 1-го рода. Связанная с данным взаимодействием магнитоупругая энергия определяет изменение полной энергии магнитного материала в результате изменения его размеров при намагничивании. Магнитоупругая энергия имеет анизотропный и изотропный вклады. Для описания динамических процессов в магнитных материалах с сильным магнитоупругим взаимодействием важен учёт магнон-фононного взаимодействия (взаимодействия спиновых волн (магнонов) и упругих волн (фононов), вызывающего магнитоупругую волну).

В магнитных материалах существует ряд явлений, обусловленных наличием кристаллического поля и его взаимосвязью с магнитной подсистемой. Одно из них – магнитокристаллическая анизотропия, вызванная, например в случае редкоземельных магнетиков, несферичностью электронного орбитального облака и влиянием кристаллического поля на магнитный момент.

Особенно сильным магнитоупругое взаимодействие является в редкоземельных металлах и их интерметаллических соединениях, что приводит к возникновению в них гигантской магнитострикции. Детальное описание целого ряда связанных с этим явлений, включая эффект Виллари (магнитоупругий эффект) и распространение магнитоупругих волн, приведено в работах К. П. Белова и других авторов (например, Del Moral, 2008).

В настоящее время разработаны экспериментальные методы, которые позволяют отслеживать непосредственно изменения (структурные фазовые переходы и изменение межатомных расстояний), возникающие в кристаллической решётке при приложении магнитного поля. Использование этих методов позволило установить, что в редкоземельных материалах с сильным магнитоупругим взаимодействием, например в диспрозии, магнитно-структурные фазовые переходы могут сосуществовать при одной температуре в нулевом магнитном поле и расходиться (происходить при различных температурах) в ненулевых магнитных полях.

В физическом сообществе активно обсуждается вопрос о том, что является «спусковым крючком» в сосуществующих магнитно-структурных фазовых переходах. Происходят ли, например, при наложении магнитного поля сначала определённые изменения в электронной и/или кристаллической структуре магнитного материала, которые и вызывают последующий магнитный фазовый переход или наоборот? Или изменения в упругой и магнитной подсистемах происходят одновременно, и что при этом происходит в электронной подсистеме магнетика? В определённом смысле это напоминает дилемму «курицы и яйца». Поскольку характерная временная шкала для обменных взаимодействий составляет 10–100 фс, то ситуация ещё более усложняется, если магнитная подсистема состоит из двух или более подрешёток, что приводит к возникновению вопроса о возможных неодновременных процессах намагничивания и магнитных превращениях в различных подрешётках. Это является чрезвычайно важным, например, для процессов перемагничивания в средах для магнитной записи информации.

Также значительную роль играют различные скорости реакции упругой и магнитной подсистем и скорости распространения взаимодействия в них. Например, установлено, что структурные изменения, связанные с магнитным фазовым переходом в сплавах с сосуществующими магнитно-структурными переходами, происходят во временном интервале сотни пикосекунд, в то время как в типичных 3d-магнетиках намагничивание происходит в субпикосекундные интервалы времени.

Магнитоупругое взаимодействие используют в технике (на этом явлении, в частности, основано действие магнитострикционных преобразователей), в функциональной электронике (управляемые магнитным полем линии

задержки, перестраиваемые резонаторы и фильтры, фазовые модуляторы, анализаторы спектра и др.) и анализаторы спектра (используют магнитоупругое взаимодействие поверхностных акустических волн с магнитоэластическими волнами в магнитных плёнках $Y_3Fe_5O_{12}$, Tb_xFe_{1-x} и др.).

Тишин Александр Метталинович

Библиография:

- Гигантская магнитострикция / К. П. Белов, Г. И. Катаев, Р. З. Левитин [и др.] // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 140, вып. 2. – С. 271–313.
- Tishin A. M. Static and dynamic stresses / A. M. Tishin, Y. I. Spichkin, J. Bohr // Handbook on the physics and chemistry of rare earths / ed. by K. A. Gschneidner, Jr., L. Eyring. – Amsterdam : North-Holland, 1999. – Vol. 26. – P. 87–176.
- Kuzmin M. D. Theory of crystal-field effects in 3d-4f intermetallic compounds / M. D. Kuzmin, A. M. Tishin // Handbook of magnetic materials / ed. by K. H. J. Buschow. – Amsterdam : Elsevier, 2007. – Vol. 17. – P. 149–233.
- Del Moral A. Handbook of magnetostriction and magnetostrictive materials. – Zaragoza : Del Moral Publisher, 2008. – 2 vol.
- Temperature and magnetic field-dependent x-ray powder diffraction study of dysprosium / A. S. Chernyshov, Y. Mudryk, V. K. Pecharsky, K. A. Gschneidner, Jr. // Physical Review B. – 2008. – Vol. 77, № 9. – P. 094132.