\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**1** **Фазовые превращения и «гигантские» эффекты в твердых телах**

*Э.Т. Дильмиева, А.П. Каманцев, В.В. Коледов, А.В. Маширов,*

*Л.С. Метлов, Е.В. Морозов, В.Д. Пойманов, С.Ю. Федотов, В.Г. Шавров*

Введение

В XXI веке исследование фазовых переходов (ФП) продолжает дарить физикам и материаловедам все новые яркие достижения, суть которых – открытие сильных или даже «гигантских» эффектов в различных твердых телах в ответ на сравнительно слабое внешнее воздействие. Часто такие сильные эффекты наблюдаются именно в тот момент, когда свойства тела спонтанно резко изменяются, как это имеет место в окрестности ФП.

В последнее время интерес к изучению ФП в различных, твердотельных материалах и средах значительно растет. Например, в магнетиках, наряду с переходами типа "порядок-беспорядок" (точки Кюри и Нееля) интенсивно исследуются ФП типа "порядок-порядок", например, спин-переориентационные или ориентационные фазовые переходы (ОФП). Хотя изменение направления осей легкого намагничивания при внешних воздействиях на магнетик наблюдалось еще в 1930-40-х годах [1-3], только в 1950-х года началось широкое изучение ОФП с позиций теории ФП Ландау (см., например, [4-10]). ОФП возникает при изменении температуры, магнитного поля, внешних упругих напряжений, состава магнетика. Несмотря на огромное разнообразие ОФП, всем им присущи общие свойства: изменение направления равновесного вектора магнитного упорядочения относительно кристаллографических осей и возникновение при приближении к ОФП мягкой моды волновых возбуждений - обращение в нуль частоты ферро- или антиферромагнитного резонанса.

Большой интерес вызывает изучение взаимодействия подсистем твердого тела, например, магнитной и упругой, взаимодействия магнитных возбуждений (спиновых волн) с другими элементарными возбуждениями кристалла, в частности, с упругими колебаниями. Первые работы, в которых было предсказано существование связанных магнон-фононных или магнитоупругих (МУ) волн в ферро- и антиферромагнетиках, появились в 1956-1959 годах. Эти работы – Турова, Ирхина [11], Ахиезера, Барьяхтара, Пелетминского [12], Киттеля [13], Пелетминского [14] фактически открыли новую область физики магнитоупорядоченных веществ (магнетиков) – магнитоакустику, нашедшую затем ряд важных применений в технике СВЧ [15-19].

Вообще говоря, МУ взаимодействия относятся к разряду сравнительно слабых взаимодействий в магнитных кристаллах. Но в некоторых ситуациях, например, в окрестности ОФП, когда энергия магнитной анизотропии уменьшается вплоть до нуля, МУ взаимодействие может оказаться определяющим (безразмерный параметр МУ связи становится не мал). Это обстоятельство может существенно повлиять на динамические, кинетические и др. свойства магнетиков. Исследование подобного рода МУ явлений, началось 1963-1965 годах в работах Рудашевского, Шальниковой [20], Тасаки, Ииды [21], Боровика-Романова, Рудашевского [22,23], Шаврова [24], Турова, Шаврова [25] (см. также [26-29]), Ииды, Тасаки [30], Мицушимы, Ииды [31]. Эти работы инициировали развитие нового направления в физике магнетизма – исследование эффектов сильного проявления относительно слабого МУ взаимодействия, интерес к которому сохраняется до сих пор.

Структурные переходы – еще одна разновидность ФП в твердых телах, которые вследствие МУ взаимодействия, могут оказаться чувствительными к магнитному полю. Особый интерес вызывает термоупругий мартенситный ФП. Это явление было открыто Курдюмовым и наблюдается в ряде интерметаллических сплавов [32, 33]. С термоупругим мартенситным переходом связаны эффекты термомеханической памяти: одно- и двухсторонний эффект памяти формы (ЭПФ) и сверухупругость [34, 35]. В конце 1990-х годов была показана возможность магнитоуправляемого термоупругого мартенситного ФП и магнитного управления ЭПФ в ферромагнитных сплавах Гейслера семейства Ni2MnGa [36, 37].

Наконец, взаимное влияние ФП – совершенно новая страница физики взаимодействия упругой и магнитной подсистем в твердом теле. Длительное время слияние магнитных и структурных ФП в некоторых веществах рассматривались, как простое совпадение. В работах [38-41], на основе теории ФП Ландау, показано, что в некоторых интерметаллических сплавах непрерывное изменение состава на фазовой диаграмме приводит к слиянию магнитного и структурного ФП в широком диапазоне составов, с образованием ФП нового типа – магнитоструктурного перехода.

В результате объединения этих и других направлений на рубеже XX и XXI веков сформировалась и вызывает стремительно растущий, судя по количеству публикаций, интерес новая область – физика функциональных твердотельных материалов. Сделаны многообещающие предложения по применению новых материалов в технике, медицине, альтернативной энергетике. Однако, и в настоящее время испытанный инструмент теоретиков – термодинамическая теория ФП второго рода Ландау служит надежным проводником в сложное сплетение различных состояний и переходов между ними во внешних полях в огромном разнообразии новых твердотельных материалов, количество которых с каждым днем лавинообразно растет, в результате усилий материаловедов, металлургов и химиков во всем мире.

Литература

1. С.В. Вонсовский. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1032 с.
2. Н.С. Акулов. Ферромагнетизм. М.-Л.: Гостехтеориздат, 1939. - 183 с.
3. Р. Бозорт. Ферромагнетизм. М.: Мир, 1956. 784 с.
4. К.П. Белов, А.К. Звездин, А.М. Кадомцева, Р.З. Левитин Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. М.: Наука, 1979. 318 с.
5. И.Е. Дикштейн, В.В. Тарасенко, З.Г. Шавров. Влияние давления на резонансные свойства одноосных ферро- и анти-ферромагиетиков. ФТТ. 1974. Т. 16. № 8. С. 2192-2197.
6. И.Е. Дикштейн, В.В. Тарасенко, В.Г. Шавров. Влияние давления на магнитоакустический резонанс в одноосных антиферромагнетиках. ЖЭТФ. 1974. Т. 67, С. 816-823.
7. Е.A. Туров, В.Г. Шавров. Нарушенная симметрия и магнитоакустические колебания в ферро- и антиферромагнетиках. Препринт № 81/1. Свердловск: ИФМ УНЦ АН СССР, 1981. 60 с.
8. Е.А. Туров, В.Г. Шавров. Нарушенная симметрия и магнитоакустические эффекты в ферро- и ангиферромагнетиках. УФН. 1983. Т. 140. № 3. С. 429-462.
9. И.Е. Дикштейн, Е.А. Туров, В.Г. Шавров. Магнитоакустические явления и мягкие моды вблизи магнитных ориентационных фазовых переходов. Под ред. С.В. Вонсовского, Е.А. Турова. Динамические и кинетические свойства магнетиков. М.: Haука, 1986. 248 с.
10. В.Г. Барьяхтар, И.М. Витебский, Ю.Г. Пашкевич, В.Л. Соболь, В.В. Тарасенко. Стрикционные эффекты и динамика магнитной подсистемы при спин-переориентационных фазовых переходах. Симметрийные эффекты. ЖЭТФ. 1984. Т. 87. № 3(9). С. 1028-1037.
11. Е.А. Туров, Ю.Н. Ирхин. О спектре колебаний ферромагнетиков упругой среды. ФММ. 1956. Т. 3. № 1. С.15-17.
12. А.И. Ахиезер, В.Г. Барьяхтар, С.В. Пелетминский. Связанные магнитоупругие волны в ферромагнетиках и ферроакустический резонанс. ЖЭТФ. 1958. Т. 35, № 1. С. 228-239.
13. С. Kittel. Interaction of waves and ultrasonic waves in ferromagnetic crystals. Phys. Rev. 1958. V. 110. № 4. P. 836-841.
14. C.B. Пелетминский. Связанные магнитоупругие колебания в антиферромагнегиках. ЖЭТФ. 1959. Т. 37. № 2. С. 452-457.
15. А.И. Ахиезер, В.Х. Барьяхтар, С.В. Пелетминский. Спиновые волны. М.: Наука, 1967. 368 с.
16. Р. Ле-Кроу, Р. Комсток. Магнитоупругие взаимодействия в ферромагнитных диэлектриках. Под ред. У. Мэзона. Физическая акустика. Том 3. Часть Б. Динамика решетки. М.: Мир, 1968. 392 с.
17. В. Штраусе. Магнитоупругие свойства иттриевого феррита-граната. Под ред. У. Мэзона. Физическая акустика. Том 4. Часть Б. Применение физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела М.: Мир, 1970. 440 с.
18. В.В. Леманов. Магнитоупругие взаимодействия. Под ред. Г.А. Смоленского. Физика магнитных диэлектриков. Л.: Наука, 1974. 454 с.
19. Е.В. Кузьмин, Г.А. Петраковский, Э.А. Завадский. Физика магнитоупорядоченных веществ. Новосибирск: Наука, 1976. 288 с.
20. E.G. Rudashevsky, T.A. Shalnikova. Antiferromagnetic resonance in hematite. Physics and Techniques of Low Temperatures. Proc. of 3rd Regional Conference. Prague. 1963. P. 84-86.
21. A. Tasaki, S. Iida, Magnetic properties of synthetic single crystal of Fe2O3. J. Phys. Soc. Japan. 1963. V. 18. № 8. Р. 1148-1154.
22. A.C. Боровик-Романов, Е.Г. Рудашевский. О влиянии спонтанной стрикции на спектр спиновых волн в антиферромагнетике со слабым ферромагнетизмом (гематит). 11-е Всесоюзное совещание по физике низких температур. Тезисы докладов. Минск. 1964. С. 39.
23. А.С. Боровик-Романов, Е.Г. Рудашевский. О влиянии спонтанной стрикции на антиферромагнитный резонанс в гематите. ЖЭТФ. 1964. Т. 47. № 6. C. 2095-2101.
24. В.Г. Шавров. Влияние магнитострикции и пьезомагнетизма на резонансные частоты слабого ферромагнетика. 11-е Всесоюзное совещание по физике низких температур. Тезисы докладов. Минск. 1964. С. 30.
25. Е.А. Туров, В.Г. Шавров. Об энергетической щели для спиновых волн в ферро- и антиферромагнетиках, связанной с магнитоупругой энергией. ФТТ. 1965. Т. 7. С. 217-226.
26. Б.Х. Ишмухаметов, А.Л. Новожилов, В.Г. Шавров. Влияние спонтанной магнитострикции на спектр магнитоупругих волн в одноосных ферромагнетиках с отрицательной константой анизотропии. Всес. совещание по физике ферро- и антиферромагнетизма. Тезисы докладов. Свердловск. 1965. С. 5.
27. В.Г. Шавров. Влияние магнитоэлектрического эффекта на антиферромагнитный резонанс. 12-е Всесоюзное совещание по физике низких температур. Тезисы докладов. Казань. 1965. С. 10.
28. В.Г. Шавров. О влиянии электрического поля на резонансную частоту антиферромагнетиков. ФТТ. 1965. Т. 7. № 1. С. 328-329.
29. В.Г. Шавров. О магнитоэлектрическом эффекте. ЖЭТФ. 1965. Т. 43. № 5. С. 1419-1426.
30. S. Iida, A. Tasaki. Magnetoelastic coupling in parasitic ferromagnet Fe203 Proc. of Intern. Conference on Magnetism. Nottingham. 1964. Р. 583-588.
31. K. Mizushima, S. Iida. Effective in-plane anisotropy field in Fe2O3. J. Phys. Soc. Japan. 1966. V.21. № 8. P.1521-1526.
32. Г.В. Курдюмов. Бездиффузионные (мартенситные) превращения в сплавах. ЖТФ. 1948. Т. 18. №. 8. С. 999-1025.
33. Г.В. Курдюмов, Л.Г. Хандрос. О термоупругом равновесии при мартенситных превращениях. ДАН СССР. 1949. Т. 66. №. 2. С. 211-214.
34. В.Г. Пушин, В.В. Кондратьев, В.Н. Хачин. Предпереходные явления и мартенситные превращения. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1998. 368 с.
35. В.А. Лихачев, С.Л. Кузьмин, З.П. Каменцева. Эффект памяти формы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 218 с.
36. И.Е. Дикшгейн, Д.И. Ермаков, В.В. Коледов, Л.В. Коледов, Т. Такаги, А.А. Тулайкова, В.Г. Шавров. Обратимый структурный фазовый переход в сплавах Ni-Mn-Ga в магнитном поле. Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72. № 7. С. 536-541.
37. A.A. Cherechukin, I.E. Dikshtein, D.I. Ermakov, A.V. Glebov, V.V. Koledov, D.A. Kosolapov, T. Takagi. Shape memory effect due to magnetic field-induced thermoelastic martensitic transformation in polycrystalline Ni–Mn–Fe–Ga alloy. Phys. Lett. A. 2001. V. 291. № 2. P. 175-183.
38. А.Д. Божко, А.Н. Васильев, В.В. Ховайло, В.Д. Бучельников, И.Е. Дикштейн, С.М. Селецкий, В.Г. Шавров. Фазовые переходы в ферромагнитных сплавах Ni2+xMn1-xGa. Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. № 3. С. 214-218.
39. A.N. Vasil’ev, A.D. Bozhko, V.V. Khovailo, I.E. Dikshtein, V.G. Shavrov, V.D. Buchelnikov, M. Matsumoto, S. Suzuki, T. Takagi, J. Tani. Structural and magnetic phase transitions in shape-memory alloys Ni2+xMn1−xGa. Phys. Rev. B. 1999. V. 59. № 2. P. 1113-1120.
40. А.Д. Божко, А.Н. Васильев, В.В. Ховайло, В.Д. Бучельников, И.Е. Дикштейн, В.В. Коледов, С.М. Селецкий, А.А. Тулайкова, В.Г. Шавров. Магнитные и структурные фазовые переходы в ферромагнитных сплавах Mi2+xMn1-xGa с памятью формы. ЖЭТФ. 1999. Т. 115. № 5. С. 1740-1755.
41. V.V. Khovaylo, V.D. Buchelnikov, R. Kainuma, V.V. Koledov, M. Ohtsuka, V.G. Shavrov, A.N. Vasiliev. Phase transitions in Ni2+xMn1−xGa with a high Ni excess. Phys. Rev.B. 2005. V. 72. № 22. P. 224408.