

узельных атомов в них. Отметим, что минимальная энергия образования собственных междоузельных атомов наблюдается при распаде дефектов упаковки, для них же зафиксировано и наиболее существенное уменьшение энергии образования под давлением.

### Список литературы

- [1] Nygren E., Aziz M.J., Turnbull D. et al. // Impur. Diff. and Gettering Silicon Symp. Boston, Mass., Nov. 27-30, 1984. Pittsburgh (Pa), 1985. P. 101-104.
- [2] Antonelli A., Bernholl J. // Phys. Rev. B. 1989. V. 40. N 15. P. 10643-10646.
- [3] Sugino O., Oshiyama A. // Phys. Rev. B. 1992. V. 46. N 19. P. 12335-12339.
- [4] Васин А.С., Окулич В.И., Пантелеев В.А. // ФТП. 1989. Т. 23. № 3. С. 483-487.
- [5] Васин А.С., Окулич В.И., Пантелеев В.А., Кудрявцева Р.В., Куприянов Е.В., Тетельбаум Д.И. // Деп. ВИНТИ. 1990. № 4808-ВДО. 19 с.
- [6] Пантелеев В.А. // ФТТ. 1979. Т. 21. № 11. С. 3388-3391.
- [7] Fair R.B. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 11. P. 5825-5832.
- [8] Hu S.M., Fahej P., Dutton R.W. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 12. P. 6912-6922.
- [9] Nichols C.S., van de Walle, Pantelidis S.T. // Phys. Rev. B. 1989. V. 40. N 8. P. 5484-5496.
- [10] Vuksevich M.L. // Phys. St. Sol. 1970. V. 40. N 1. P. 193-205.

Нижегородский государственный университет  
им. Н.И.Лобачевского

Поступило в Редакцию  
6 ноября 1992г.  
В окончательной редакции  
29 сентября 1993 г.

УДК 535.343.2

© Физика твердого тела, том 36, № 2, 1994  
*Solid State Physics, vol. 36, N 2, 1994*

## ПОЛЕВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ФАРАДЕЕВСКОГО ВРАЩЕНИЯ ТЕРБИЙ-ИТТРИЕВОГО ФЕРРИТА-ГРАНАТА $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

*У.В.Валиев*

Хорошо известно, что характерные особенности магнитных, оптических свойств редкоземельных ферритов-гранатов (РЗФГ) обусловлены своеобразием электронной структуры  $4f$ -оболочки редкоземельного (РЗ) иона. Эта оболочка формируется в структуре граната кристаллическим окружением низкой симметрии (группа симметрии  $D_2$ ), полностью снимающим вырождение электронных энергетических уровней основного и возбужденных мультиплетов РЗ-ионов. Поэтому при гелиевых температурах, когда максимальна несферичность  $4f$ -оболочки, термодинамические свойства РЗФГ определяются самыми нижними шарковскими подуровнями основного мультиплета РЗ-иона. Особенно отчетливо это проявляется при исследовании магнитных [1], магнитооптических [2] свойств тербий-иттриевых ферритов-гранатов  $Tb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  (ТИФГ) с малым содержанием ионов  $Tb^{3+}$  ( $x \leq 0.65$ ) в магнитных полях  $\sim 75$  кЭ при гелиевых температурах.

Скачкообразные изменения намагниченности и эффекта Фарадея интерпретировались с точки зрения «магнитного эффекта Яна-

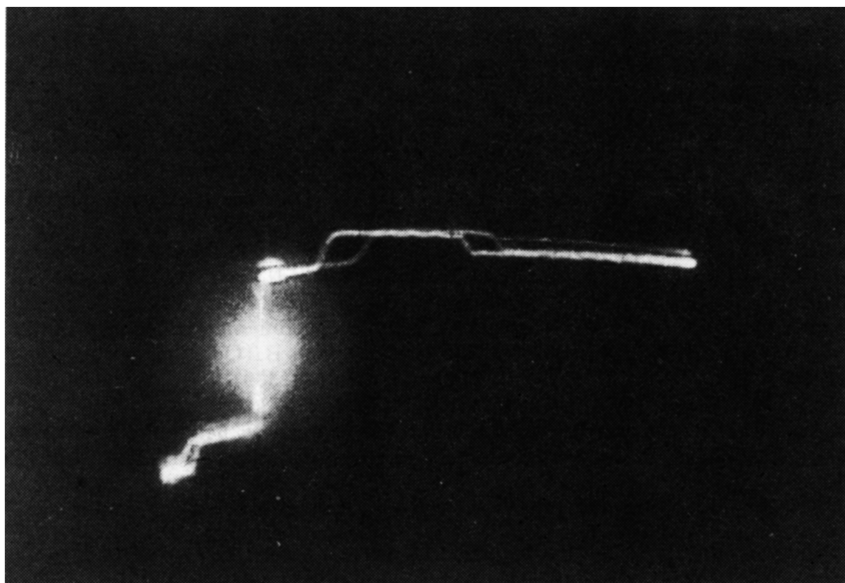


Рис. 1. Экспериментальная осциллограмма полевой зависимости эффекта Фарадея  $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  вдоль направления  $[111]$  в поле  $H \approx 150$  кЭ при  $T = 4.2$  К.

Длина волны  $\lambda = 1.15$  мкм, толщина образца  $d \approx 300$  мкм.

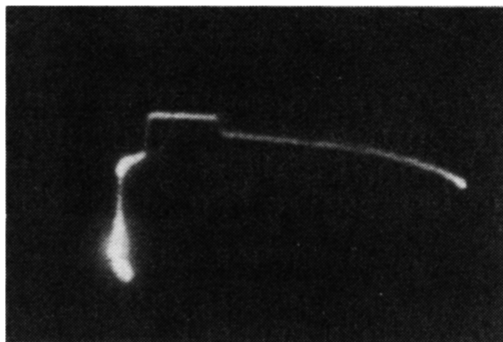
Теллера»  $[1-3]$  — возникновения неустойчивости магнитной структуры вблизи точек вырождения электронных состояний  $4f$ -ионов, сопровождающейся инверсией (пересечением) основного и первого возбужденного штарковского подуровней энергии РЗ-иона  $Tb^{3+}$ . В дальнейшем исследования магнитных свойств системы ТИФГ с  $x \leq 0.65$ , выполненные в работах  $[4,5]$ , показали, что в полях, больших 200 кЭ, наблюдается процесс перестройки магнитной структуры при возрастании магнитных полей, ориентированных вдоль осей второго, третьего и четвертого порядков кубического кристалла. Но в отличие от скачка намагниченности при  $H_k = 75$  кЭ перемагничивание РЗ-подрешетки в этой области полей происходило более плавным образом, что с феноменологической точки зрения было связано (по мнению авторов  $[4,5]$ ) с изменением пространственной ориентации магнитных моментов РЗ-подрешетки. В настоящее время желательным представляется сопоставление полевых зависимостей фарадеевского вращения и намагниченности ТИФГ (с  $x \leq 0.65$ ) в области магнитных полей  $H \geq 200$  кЭ, что существенным образом может облегчить интерпретацию экспериментальных данных, полученных в сильных полях.<sup>1</sup>

Указанное обстоятельство и послужило основной причиной постановки настоящей работы, в которой исследования эффекта Фарадея (на длине волны  $\lambda = 1.15$  мкм) проводились в импульсных магнитных полях до 250 кЭ при температуре  $T = 4.2$  К. Измерения углов фарадеевского вращения выполнялись стандартным интенсивностным методом

<sup>1</sup> При низких температурах относительный вклад РЗ-подрешетки ферритовгранатов в эффект Фарадея существенно превышает аналогичный вклад РЗ-ионов в результирующую намагниченность РЗФГ.

**Рис. 2.** Экспериментальная осциллограмма полевой зависимости эффекта Фарадея  $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  вдоль направления  $[111]$  в магнитном поле  $H \approx 250$  кЭ.

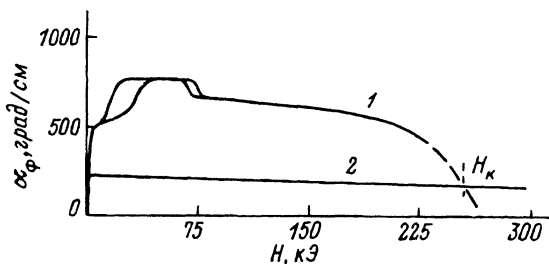
Длина волны  $\lambda = 1.15$  мкм, толщина образца  $d \approx 300$  мкм. На экспериментальной осциллограмме почти не наблюдается фарадеевское вращение, связанное с обратным полупериодом импульса магнитного поля вследствие сильного перегрева импульсного соленоида при  $H \approx 250$  кЭ.



с использованием двухлучевой методики регистрации эффекта Фарадея (с призмой Волластона) [6]. Охлаждение образцов осуществлялось обдуванием струей пара заданной температуры в проточном гелиевом криостате [7].

На рис. 1 приведена экспериментальная осциллограмма полевой зависимости фарадеевского вращения ТИФГ  $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  вдоль кристаллографической оси  $[111]$  в полях  $\sim 150$  кЭ при  $T = 4.2$  К. В поле  $H_k = 75$  кЭ наблюдается скачок эффекта Фарадея, связанный с инверсией нижних штарковских подуровней основного мультиплета  ${}^7F_6$  РЗ-иона  $Tb^{3+}$  в феррит-гранат. Сопоставляя результаты измерений эффекта Фарадея с результатами измерений намагниченности (см., например, [2]), нетрудно показать, что при  $H > H_k$  почти не меняется магнитный момент железной подрешетки, а увеличение намагниченности ТИФГ в этом поле связано со значительным уменьшением ориентированного антипараллельно полю магнитного момента тербиевой подрешетки.<sup>2</sup>

Что же касается результатов измерений эффекта Фарадея в сильных полях ( $\sim 250$  кЭ), то из экспериментальной осциллограммы (рис. 2) следует, что в полях  $> 200$  кЭ наблюдается плавное уменьшение фарадеевского вращения при ориентации поля вдоль оси  $[111]$ ,



**Рис. 3.** Полевые зависимости фарадеевского вращения ферритов-гранатов  $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  (1) и  $Y_3Fe_5O_{12}$  (2) в магнитном поле  $H \approx 250$  кЭ, приложенном вдоль кристаллографической оси  $[111]$  при  $T = 4.2$  К на длине волны  $\lambda = 1.15$  мкм.

<sup>2</sup> Действительно, обработка экспериментальных данных по измерению эффекта Фарадея (рис. 1), согласно методике, предложенной в работе [3], показала, что значения магнитных моментов тербиевой и железной подрешеток при  $H > H_k$  составили соответственно  $M_{Tb} = -(1.18 \pm 0.1) \mu_B$  и  $M_{Fe} = (4.83 \pm 0.1) \mu_B$ , т.е. магнитный момент РЗ-подрешетки в ТИФГ уменьшился почти в два раза по сравнению с областью полей  $H < H_k$ . Это хорошо согласуется по величине с аналогичными данными, полученными в работе [3] при измерении эффекта Фарадея по длине волны  $\lambda = 0.63$  мкм (при  $H < H_k - M_{Tb} = -2 \mu_B$ ,  $M_{Fe} = 5 \mu_B$ ).

что, по-видимому, может быть связано с уменьшением вклада РЗ-подрешетки ионов  $Tb^{3+}$  в эффект Фарадея  $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ . Это наглядно проявляется при сравнении полевой зависимости эффекта Фарадея  $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  с полевой зависимостью эффекта Фарадея иттриевого  $Y_3Fe_5O_{12}$ , измеренной при той же температуре (рис. 3). Экстраполяция полевой зависимости эффекта Фарадея  $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  вплоть до пересечения с полевой зависимостью иттриевого феррит-граната (рис. 3) показывает, что величина молекулярного поля, характерного для данной концентрации ионов  $Tb^{3+}$ , составляет  $H_m^0 \approx 260$  кЭ, так как именно в этом поле вклад РЗ-подрешетки в результирующую намагниченность (а также в эффект Фарадея) ТИФГ обращается в нуль.<sup>3</sup>

На наш взгляд, с микроскопической точки зрения физической причиной отсутствия скачкообразных изменений эффекта Фарадея (и намагниченности) в области полей  $\geq 200$  кЭ может служить нарушение условия уединенности основного квазидублета РЗ-иона  $Tb^{3+}$ , вызванное значительным «перемешиванием» в сильном магнитном поле базисных функций  $|JM_J\rangle$  основного квазидублета и ближайшего к нему возбужденного штарковского подуровня основного мультиплета. Другими словами, уменьшение вклада РЗ-подрешетки может быть обусловлено нарушением условия «квазиизинговости» РЗ-иона  $Tb^{3+}$  в структуре ТИФГ в сильных магнитных полях, что, вообще говоря, подтверждается результатами сравнения энергетической структуры изинговских и «квазиизинговских» РЗ-ионов в структуре РЗФГ [5].

#### Список литературы

- [1] Демидов В.Г., Левитин Р.З., Попов Ю.Ф. // ФТТ. 1976. Т. 18. № 3. С. 596–598.
- [2] Валиев У.В., Кринчик Г.С., Левитин Р.З., Мукумов К.М. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. № 4. С. 239–243.
- [3] Звездин А.К., Матвеев В.М., Мухин А.А., Попов А.И. Редкоземельные ионы в магнитоупорядоченных кристаллах. М., 1985. С. 296.
- [4] Лагутин А.С., Дмитриев А.В. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 11. С. 2959–2965.
- [5] Лагутин А.С., Дружинина Р.Ф. // ЖЭТФ. 1992. Т. 102. № 6(12). С. 1860–1871.
- [6] Валиев У.В. // Автореф. докт. дис. Х., 1993.
- [7] Милов В.Н. // Автореф. канд. дис. М., 1977.

Ташкентский государственный университет

Поступило в Редакцию  
11 октября 1993 г.

<sup>3</sup> Следует иметь в виду, что при малых концентрациях ионов  $Tb^{3+}$  ( $x \leq 0.65$ ) в ТИФГ внешнее и молекулярное поля ориентированы антипараллельно друг другу.