

Спектрально-зависимые фотоиндуцированные изменения оптического поглощения в легированных монокристаллах иттрий-железистых гранатов

© Р.А. Дорошенко, М.Д. Надеждин

Институт физики молекул и кристаллов Российской академии наук,
450075 Уфа, Россия

E-mail: dar@anrb.ru
imcp@bash.ac.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 20 декабря 2000 г.)

Обнаружена зависимость фотоиндуцированного оптического поглощения α на длине волны $1.1 \mu\text{m}$ от длины волны воздействующего света в интервале $0.6\text{--}1.9 \mu\text{m}$. Показано, что в кристалле $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с акцепторной примесью Ва фотоиндуцированное возрастание α связано с образованием ионов Fe^{4+} в октаэдрических узлах. Перенос заряда происходит через фотовозбуждение переходов ${}^6A_{1g}({}^6S) \rightarrow {}^4T_{1g}({}^4G)$, ${}^4T_{2g}({}^4G)$ октаэдрических ионов Fe^{3+} . В кристалле с донорной примесью Si возрастание α обусловлено образованием ионов Fe^{2+} при фотоионизации кремния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 96-02-19255).

Исследование изменения оптических свойств магнитоупорядоченных материалов под воздействием света представляет не только самостоятельный интерес, но и важно в связи со всесторонним изучением в последнее время фотоиндуцированных магнитных явлений в иттрий-железистых гранатах (ИЖГ) [1,2]. Ранее наблюдалось увеличение оптического поглощения для образцов $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, легированных Ca^{2+} , и просветление для образцов, легированных Si^{4+} , на длине волны $\lambda = 1.1 \mu\text{m}$ [3]. Изменение оптического поглощения в спектральном диапазоне $0.7\text{--}2.0 \mu\text{m}$ в нелегированных монокристаллах ИЖГ изучалось после воздействия импульсов света [4,5]. Недавно была обнаружена зависимость фотоиндуцированных изменений оптического поглощения от спектрального состава и последовательности воздействия света различного спектрального состава [6]. Для образцов ИЖГ(Ва) освещение увеличивает оптическую плотность, а в ИЖГ(Si) поглощение уменьшается (в скобках указана основная примесь). Причем для ИЖГ(Si) максимальный эффект обнаружен при освещении через ИКС-7, а для ИЖГ(Ва) — при освещении через КС-17.

Исследование спектра фоточувствительности на длине волны $1.1 \mu\text{m}$ с помощью узкозонных светофильтров было проведено ранее [7]. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований фотоиндуцированных изменений коэффициента оптического поглощения α на длине волны $1.1 \mu\text{m}$ при монохроматическом воздействии света в диапазоне $0.6\text{--}1.9 \mu\text{m}$. С целью выяснения особенностей фотоиндуцированных изменений α при последовательном воздействии света изучались временные зависимости изменения α при воздействии света на характерных длинах волн.

Измерения проведены на монокристаллах, выращенных из различных растворителей. Монокристаллы, леги-

рованные кремнием (ИЖГ:Si), выращены из свинцового растворителя $\text{PbO}\text{--}\text{PbF}_2$, а монокристаллы с примесью бария (ИЖГ(Ва)) — из растворителя $\text{BaO}\text{--}\text{Ba}_2\text{O}_3$ [8]. Присутствие ионов бария обнаружено методом масс-спектрометрии вторичных ионов. В образцах, легированных кремнием $\text{Y}_3\text{Fe}_{5-x}\text{Si}_x\text{O}_{12}$, содержание кремния по закладке составляло $x = 0.04$. Образцы для исследования изготовлены в виде полированных монокристаллических дисков толщиной 0.5 mm .

Источником излучения для фотовоздействия являлась вольфрамовая лампа накаливания мощностью 400 W . Монохроматическое излучение от дифракционного монохроматора МДР-12 получено при спектральной ширине излучения $\Delta\lambda$ на выходе монохроматора, равной $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$ в интервале $0.6\text{--}1 \mu\text{m}$ и $\Delta\lambda = 40 \text{ nm}$ в интервале $1\text{--}1.9 \mu\text{m}$. Интенсивность света P_0 поддерживалась постоянной и равной 15 и 33 mW/cm^2 в интервалах $0.6\text{--}1$ и $1\text{--}1.9 \mu\text{m}$ соответственно. Как показали измерения зависимости оптического поглощения на длине $1.1 \mu\text{m}$ от времени после включения измерительного света, влияния измерительного света интенсивностью $\sim 10 \mu\text{W}$ на величину оптического поглощения не наблюдалось.

Измерение величины оптического эффекта осуществлялось на фиксированной длине волны $1.1 \mu\text{m}$ и дискретном сканировании по спектру облучения в интервале $0.6\text{--}1.9 \mu\text{m}$. Для повышения чувствительности и стабильности измерительной схемы использована амплитудная модуляция измерительного луча и последующее синхронное детектирование с постоянной времени $\tau = 0.3 \text{ s}$.

Образец, помещенный в жидкий азот, освещался до насыщения эффекта, при этом регистрировалось изменение интенсивности измерительного луча до (I_d) и после (I_1) воздействия света на длине волны λ_{ir} . Из-

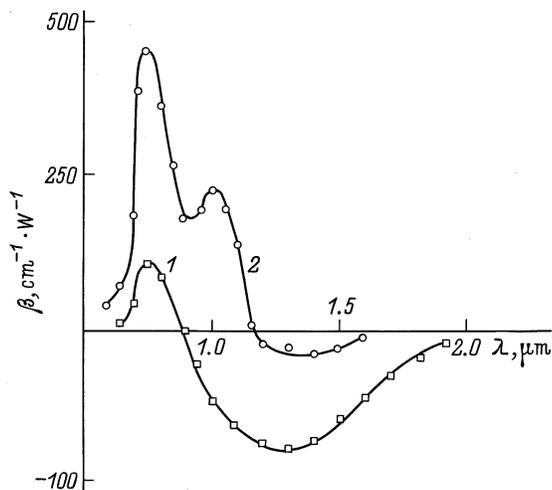


Рис. 1. Зависимости фотоиндуцированного изменения оптического поглощения $\beta = d(\alpha_1 - \alpha_d)/P_0$ на длине волны $1.1 \mu\text{m}$ после воздействия монохроматического света λ_{ir} в образцах ИЖГ(Si) — 1 и ИЖГ(Ba) — 2.

мерение величины эффекта при новом значении длины волны λ_{ir} проводилось после нагрева образца до комнатной температуры. Нормированная на единицу площади спектральная чувствительность оптического эффекта $\beta = (1/P_0) \ln(I_d/I_1)$ в точке λ_{ir} рассчитывалась по измеренным значениям интенсивности I_d и I_1 с учетом мощности потока облучения P_0 . При таком определении значение спектральной чувствительности оптического эффекта $\beta(\lambda_{ir})$ равно изменению коэффициента поглощения ($\Delta\alpha$) на единицу мощности облучения и при интенсивности $P_0(\lambda_{ir})$ на длине волны λ_{ir} : $\beta = d\Delta\alpha/P_0 = d(\alpha_1 - \alpha_d)/P_0$, где α_d, α_1 — коэффициент поглощения на длине волны $1.1 \mu\text{m}$ до и после освещения соответственно, d — толщина образца. Уменьшение α ($\Delta\alpha < 0$) происходит при освещении светом с длинами волн из интервала, в котором $\beta(\lambda_{ir}) < 0$ и, напротив, возрастание α ($\Delta\alpha > 0$) возникает при воздействии света из спектрального интервала, в котором $\beta(\lambda_{ir}) > 0$.

Исследован спектр фоточувствительности эффекта фотоиндуцированного изменения оптического поглощения иттрий-железистых гранатов (рис. 1). Спектр фоточувствительности ИЖГ(Si) показал (кривая 1), что воздействие света в интервале 0.9 – $1.9 \mu\text{m}$ вызывает уменьшение $\alpha_{1.1}$ (максимум эффекта "просветления" наблюдается при $1.25 \mu\text{m}$), а при освещении в интервале 0.6 – $0.9 \mu\text{m}$ наблюдается возрастание $\alpha_{1.1}$ (максимум эффекта "затемнения" наблюдается при $0.75 \mu\text{m}$). Смена знака эффекта происходит при $0.9 \mu\text{m}$. Величины эффекта фотоиндуцированного "просветления" и "затемнения" одного порядка. В ИЖГ(Ba) "просветление" вызывается светом 1.15 – $1.6 \mu\text{m}$, "затемнение" наблюдается при 0.6 – $1.15 \mu\text{m}$, смена знака эффекта происходит при $1.15 \mu\text{m}$ (кривая 2). В области "затемнения" имеются

две особенности при 0.75 и $1.0 \mu\text{m}$. Величина "просветления" на порядок меньше эффекта "затемнения".

Исследованы временные зависимости изменения коэффициента оптического поглощения при последовательном воздействии различного монохроматического излучения (рис. 2). Воздействие монохроматического света на длине волны $1.3 \mu\text{m}$ вызывает быстрое уменьшение оптического поглощения в исследованных образцах ИЖГ(Ba) и ИЖГ(Si) (кривые 1 и 2, интервалы AB). Величина наблюдаемого эффекта в ИЖГ(Ba) мала, а в ИЖГ(Si) сравнима с эффектом возрастания оптического поглощения при воздействии света на длине волны $0.8 \mu\text{m}$. При выключении воздействия света ($1.3 \mu\text{m}$) наблюдается незначительная релаксация эффекта. Повторное воздействие света вызывает уменьшение поглощения, равное величине релаксирующей части эффекта (кривая 2). Первоначальное воздействие монохроматического света на длине волны $0.8 \mu\text{m}$ вызывает возрастание оптического поглощения в обоих образцах (кривые 1 и 2, интервалы CD). Процесс возрастания поглощения более медленный. Причем в образце ИЖГ(Ba) после насыщения эффекта фотоиндуцированного затемнения при выключении воздействия света наблюдается самопроизвольное увеличение поглощения (кривая 1, интервал DE), тогда как при выключении света до до-

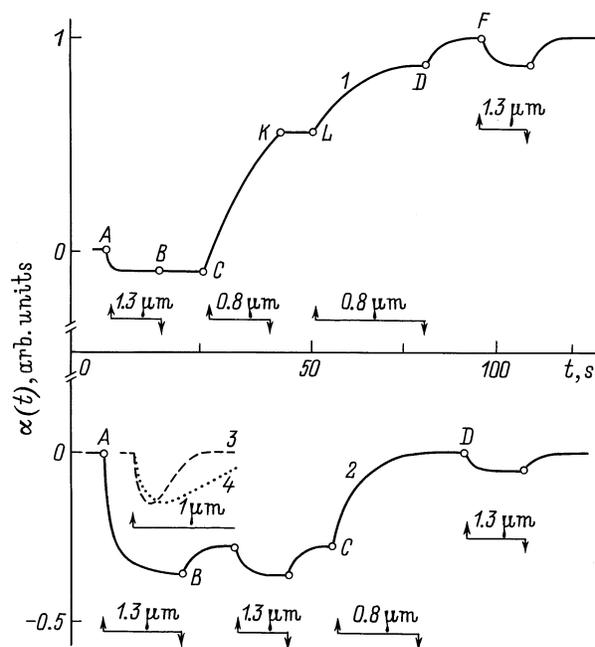


Рис. 2. Временные зависимости фотоиндуцированного изменения коэффициента оптического поглощения $\alpha(t)$ на длине волны $1.1 \mu\text{m}$ в образцах ИЖГ(Ba) — 1 и ИЖГ(Si) — 2–4. Кривая 3 получена при интенсивности облучения $P_0 = 40 \text{ mW/cm}^2$, 4 — при $P_0 = 10 \text{ mW/cm}^2$. Отрезки со стрелками обозначают время воздействия света, стрелки вверх и вниз — моменты включения и выключения света соответственно. Цифры над отрезками — длины волн монохроматического излучения.

стижения насыщения сохраняется значение оптического поглощения, имеющее место в момент выключения света (кривая *I*, интервал *KL*). Последующее воздействие света с длиной волны $1.3 \mu\text{m}$ (точки *F* и *D*) вызывает обратимое уменьшение α . При воздействии света на длинах волн $1-1.1 \mu\text{m}$ после быстрого уменьшения оптического поглощения наблюдается более медленное возрастание оптического поглощения соответственно до темнового значения в ИЖГ(Si) и значительно превышающего темновую величину в ИЖГ(Ba).

Зависимость оптического эффекта от λ_{ir} измерена на длине волны $1.1 \mu\text{m}$ в спектральной области, где уровень оптического поглощения в иттрий-железистых гранатах растет с увеличением концентрации ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{4+}$ [9,10]. На оптическое поглощение сильное влияние оказывает искажение симметрии (структурных искажений), наличие упругих напряжений и заряженных примесей [11]. Поэтому можно полагать, что изменение коэффициента оптического поглощения при освещении связано с изменением валентности ионов железа и положением ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{4+}$ относительно легирующих примесей и других структурных искажений. Влияние света на анизотропию, другие магнитные свойства данных образцов являются дополнительным доводом в пользу такого предположения [12,13]. Механизм образования иновалентных ионов зависит от типа примеси в образце. В кристалле с акцепторным легированием ИЖГ(Ba) возрастание α связано с образованием Fe^{4+} при фотовозбуждении октаэдрического иона Fe^{3+} , электронные переходы которого имеют энергии [9]: $10\,800 \text{ cm}^{-1} - [{}^6A_{1g}({}^6S) \rightarrow {}^4T_{1g}({}^4G)]$ и $14\,200 \text{ cm}^{-1} - [{}^6A_{1g}({}^6S) \rightarrow {}^4T_{2g}({}^4G)]$, близкие к энергии максимумов (на 0.75 и $1 \mu\text{m}$) в спектре, приведенном на рисунке. Наблюдаемое различие объясняется тем, что ионы Fe^{4+} образуются в искаженных энергетически выгодных октаэдрических положениях, в которых возможна долговременная локализация при температуре жидкого азота. Обнаруженные пики на спектральной зависимости указывают на то, что перенос заряда на свободные акцепторные уровни бария при образовании ионов Fe^{4+} осуществляется при фотовозбуждении указанных переходов ионов Fe^{3+} . Исследованные временные зависимости показывают, что возрастание оптического поглощения в ИЖГ(Ba) носит необратимый характер. Для возвращения оптического поглощения в исходное состояние необходимо нагревание образца. Обратимое небольшое уменьшение оптического поглощения в ИЖГ(Ba) (точка *F*) может быть связано с уменьшением количества нетрехвалентных ионов железа или их перераспределением от "ближних" относительно легирующих ионов к "дальним" положениям. Совместный анализ спектральной зависимости и временных изменений оптического поглощения в ИЖГ:Si позволяет сделать следующие выводы. В кристалле с донорным легированием ИЖГ:Si возрастание α связано с образованием ионов Fe^{2+} преимущественно в "дальнем" относительно Si^{4+} положении вследствие фотоионизации кремния и локализации

фотоэлектрона на вакантный (до освещения) уровень 5E_g иона Fe^{2+} [10]. В пользу "дальних" положений свидетельствуют малая величина и обратимый характер эффекта последующего "просветления" при воздействии света на длине волны $1.3 \mu\text{m}$ (точки *D*). Первоначальное уменьшение α в ИЖГ(Si) (интервал *AB*) объясняется перераспределением ионов Fe^{2+} в выгодные "дальние" узлы [3], в которых оптическое поглощение меньше из-за более слабых структурных искажений. Как следует из изменений оптического поглощения, при поочередном воздействии различного монохроматического излучения обратного перераспределения ионов Fe^{2+} из дальних в ближние не происходит.

Список литературы

- [1] Фотомагнетизм. Тр. ИОФРАН **44** (1992).
- [2] В.Ф. Коваленко, Э.Л. Нагаев. УФН **148**, 561 (1986).
- [3] E.M. Gyorg, J.F. Dillon, J.P. Remeika. J. Appl. Phys. **42**, 4, 1454 (1971).
- [4] K. Hisatake, I. Matsubara, K. Maeda, H. Yasuoka, H. Mazaki, K. Uematsu. J. Magn. Magn. Mater. **140-144**, 2127 (1995).
- [5] K. Hisatake, I. Matsubara, K. Maeda, H. Yasuoka, H. Mazaki, K. Uematsu. J. Magn. Soc. Jap. **19**, S1, 263 (1995).
- [6] Р.А. Дорошенко, М.Д. Надеждин. ФТТ **38**, 10, 3075 (1996).
- [7] Р.А. Дорошенко, М.Д. Надеждин. Тез. XIV школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники". Москва (1994). Ч. 3. С. 58.
- [8] В.А. Тимофеева. Рост кристаллов из растворов-расплавов. Наука, М. (1978). 268 с.
- [9] D.L. Wood, J.P. Remeika, J. Appl. Phys. **38**, 3, 1038 (1967).
- [10] G.B. Scott, J.L. Page. Phys. Stat. Sol. (b) **79**, 1, 203 (1977).
- [11] В.В. Рандошкин, А.Я. Червонокис. Прикладная магнитооптика. Энергоатомиздат, М. (1990). 319 с.
- [12] Р.А. Дорошенко, М.С. Сетченков, И.В. Владимиров, В.А. Тимофеева. ФТТ **34**, 377 (1992).
- [13] Р.А. Дорошенко. Тр. ИОФРАН **44**, 105 (1992).