

Спектр фотоиндуцированного изменения коэффициента поглощения в легированных монокристаллах $Y_3Fe_5O_{12}$

© М.Д. Надеждин

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

E-mail: MDNad@anrb.ru, impc@anrb.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 17 февраля 2006 г.)

Экспериментально исследованы спектры фотоиндуцированного изменения коэффициента поглощения α в диапазоне $0.7-1.9 \mu\text{m}$ в монокристаллах иттрий-железистых гранатов с различным типом основной примеси. Показано, что особенности фотоиндуцированных спектров зависят как от типа примеси в кристалле, так и от спектра индуцирующего излучения. Экспериментальные результаты объясняются изменением поглощения на ионах Fe^{2+}/Fe^{4+} и изменением интенсивности собственных переходов ионов Fe^{3+} вблизи заряженных дефектов.

PACS: 75.50.-y, 78.20.Ci, 78.40.Na

1. Введение

Интерес к исследованию редкоземельных гранатов обусловлен уникальными физическими характеристиками материалов и перспективами применения этих систем в прикладных целях — в качестве элементов оптоэлектроники [1]. Фотоиндуцированные эффекты, обнаруженные в гранатах — изменение электрических, магнитных, оптических и др. свойств [2] под действием света — позволяют создать аналогичные устройства, управляемые светом, и представляют интерес как инструмент исследования реальной структуры твердого тела.

В большинстве экспериментальных работ по фотоиндуцированным свойствам гранатов исследовались кристаллы с различными видами легирования и различной концентрацией примеси [3–5]. При таком подходе выявляются особенности фоточувствительных свойств, обусловленные природой точечных дефектов, что является определяющим для изотропных эффектов [4]. Менее исследовано влияние спектрального состава излучения на фотоиндуцированные эффекты. Для иттрий-железистых гранатов (ИЖГ) спектрально-зависимые фотомагнитные измерения проводились авторами работ [6,7]; измерения дают информацию об изменении состояния магнитных центров. При оптических (или электрических) измерениях регистрируются изменения как на магнитных, так и на немагнитных центрах. В работе [8] показано, что переход в другое состояние немагнитных центров в некоторых случаях активизирует дальнейшие изменения и на магнитных ионах. Комплексное исследование, таким образом, позволяет делать более определенные выводы о природе и роли центров в фотоиндуцированных процессах.

Особенности фотоиндуцированного изменения оптического поглощения в ИЖГ в зависимости от типа примеси (донорное, акцепторное легирование), дефектов решетки (анионные, катионные вакансии) и концентрации примесей исследовались в [3–5,9]; в [10] обна-

ружено, что в ИЖГ эффект изменения коэффициента поглощения α при освещении является спектрально-зависимым эффектом. Из недавних работ следует отметить работы [11,12], в которых представлены результаты детального исследования фотоиндуцированных магнитооптических свойств сложных кальций-марганец-германиевых гранатов ($Ca_3Mn_2Ge_3O_{12}$) [11,12].

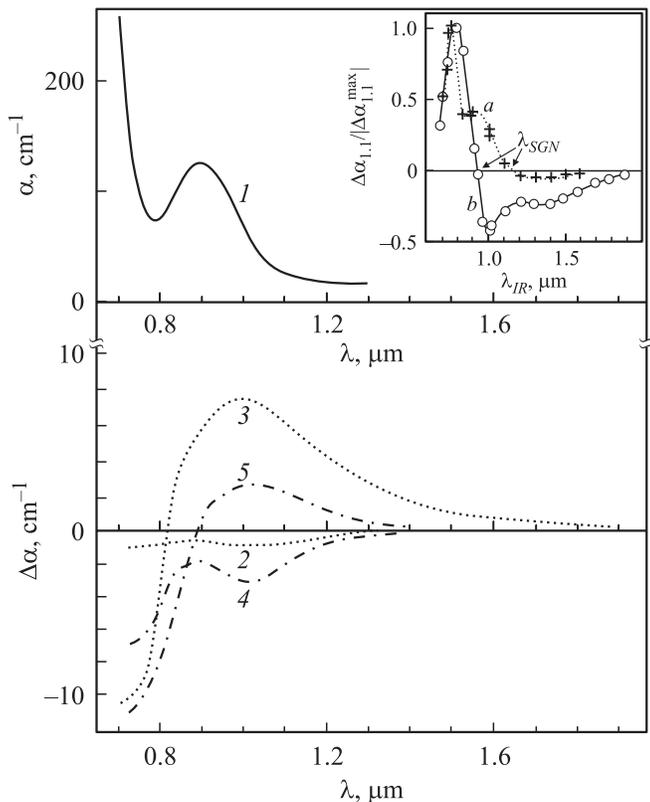
Приведенные в настоящей работе экспериментальные результаты получены на фотомагнитных кристаллах ИЖГ:Si и ИЖГ(Ba), в которых обнаружены изменения магнитных и оптических свойств под действием как поляризованного, так и неполяризованного света [13,14].

В работе [14] получена зависимость фотоиндуцированных изменений оптического поглощения $\Delta\alpha_{1.1}(\lambda_{IR})$ от длины волны „монокроматического“ излучения λ_{IR} в спектре фотовозбуждения с регистрацией эффекта на $1.1 \mu\text{m}$. В спектре фотовозбуждения выделено значение длины волны λ_{SGN} , вблизи которого происходит смена знака эффекта: воздействие света с длинами волны большими λ_{SGN} ($\lambda_{IR} > \lambda_{SGN}$) вызывает уменьшение поглощения $\Delta\alpha_{1.1} < 0$, а при „коротковолновом“ освещении ($\lambda_{IR} < \lambda_{SGN}$) наблюдается возрастание коэффициента поглощения и $\Delta\alpha_{1.1} > 0$ (вставка на рисунке).

Настоящая работа является дальнейшим развитием работы [14], поскольку здесь представлены результаты измерения эффекта фотоиндуцированного изменения коэффициента поглощения $\Delta\alpha(\lambda)$ в широком спектральном диапазоне $\lambda = 0.7-1.9 \mu\text{m}$ при воздействии излучения из интервала длин волн, индуцирующих эффект разного знака на длине волны $1.1 \mu\text{m}$ [14].

2. Образцы и методика измерения

Измерения проведены на монокристаллах, выращенных из растворов-расплавов различного состава. Монокристалл, легированный кремнием (ИЖГ:Si), выращен из раствора-расплава на основе соединений свинца $PbO-PbF_2$ с добавлением SiO_2 . В образцах



Спектр поглощения $\alpha(\lambda)$ ИЖГ в области октаэдрических переходов ионов Fe^{3+} (1) и спектры фотоиндуцированного изменения коэффициента поглощения $\Delta\alpha(\lambda)$ в ИЖГ(Ba) (2,3) и ИЖГ:Si (4,5), индуцированные излучением различных спектральных диапазонов $\Delta\lambda_{\text{IR}}$ при 80 К. $\Delta\lambda_{\text{IR}}$, μm : 2 — 1.5–2.0, 3 — 0.65–0.90, 4 — 1.0–2.0, 5 — 0.65–0.90. На вставке показано относительно фотоиндуцированное изменение коэффициента поглощения $\Delta\alpha_{1,1}/|\Delta\alpha_{1,1}^{\text{max}}|$ в кристаллах ИЖГ(Ba) (a) и ИЖГ:Si (b) при воздействии монохроматического излучения λ_{IR} . Измерения эффекта проводились на длине волны $\lambda_m = 1,1 \mu\text{m}$. Стрелками указаны точки смены знака эффекта λ_{SGN} в спектре фотовоздействия: для ИЖГ(Ba) — $\lambda_{\text{SGN}} \approx 1.15 \mu\text{m}$, для ИЖГ:Si — $\lambda_{\text{SGN}} \approx 0.9 \mu\text{m}$ [14]. Экспериментальные результаты работы [14] нормированы на максимальное по абсолютной величине значение эффекта и исправлены с учетом поглощения в образце.

$\text{Y}_3\text{Fe}_{5-x}\text{Si}_x\text{O}_{12}$ содержание кремния по закладке составляло $x = 0.04 \text{ at./form.un.}$ Монокристалл ИЖГ(Ba) выращен из BaO–B₂O₃-расплава без специальных легирующих добавок и номинально является нелегированным, но в ИЖГ(Ba) методами масс-спектропии вторичных ионов обнаружено присутствие ионов бария. Образцы для измерений изготовлены в виде плоскопараллельных пластин толщиной от 130 до 300 μm с ориентацией поверхности пластины параллельно плоскости (110).

Для наведения эффекта использовалась галогенная лампа накаливания — КГМ-150/24. Необходимые интервалы длин волн из спектра лампы выделялись широкополосным фильтром (1.5–2.0 μm), оптическим стеклом ИКС-7 и комбинацией оптических фильтров

(СЗС-25 + КС-17). Интенсивность фотовоздействия в экспериментах варьировалась от 20 до 90 mW/cm^2 .

Измерения проведены на спектрально-оптическом комплексе КСВУ-12, для регистрации интенсивности измерительного луча использованы схема амплитудной модуляции и последующее синхронное детектирование. Интенсивность измерительного луча составляла $\sim 10 \mu\text{W/cm}^2$, и при данной интенсивности света не обнаружено регистрируемого воздействия на поглощение.

После охлаждения образца до 80 К регистрировались две спектральные зависимости: 1) до освещения образца и 2) после освещения образца — до насыщения эффекта, что контролировалось по временной зависимости изменения $\alpha(t)$ в процессе освещения в начальной точке интервала регистрации λ_0 . Характерные времена насыщения эффекта равны $\sim 10\text{--}50 \text{ s}$, они зависят от спектрального состава индуцирующего излучения [14]. Регистрация спектров проводилась методом дискретного сканирования по длине волны с постоянным шагом $\Delta\lambda$ ($\Delta\lambda = 10\text{--}20 \text{ nm}$) в точках $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_N$ ($\lambda_N = \lambda_0 + N \cdot \Delta\lambda$, где N — номер точки), накопление и последующая обработка результатов измерений осуществлялись по заданной программе.

При определении коэффициента поглощения α на основе известного выражения $I = I_0 \cdot \exp(-\alpha t)$ изменение коэффициента поглощения $\Delta\alpha(\lambda_N)$ выражается через измеряемые в эксперименте интенсивности измерительного луча [3,5,12]

$$\Delta\alpha(\lambda_N) = (1/t) \ln(I_D/I_L), \quad (1)$$

где $I_D(\lambda_N)$ и $I_L(\lambda_N)$ — соответственно интенсивности измерительного луча „до“ и „после“ освещения образца до насыщения эффекта; t — толщина образца (см). Из (1) следует, что $\Delta\alpha(\lambda_N) = \alpha_L(\lambda_N) - \alpha_D(\lambda_N)$ есть разность спектров „до“ $\alpha_D(\lambda_N)$ и „после“ $\alpha_L(\lambda_N)$ освещения кристалла. Непрерывная графическая зависимость $\Delta\alpha(\lambda)$ получена интерполяцией дискретных значений с помощью математического обеспечения комплекса. Использование (1) предполагает, что изменение коэффициента отражения при освещении пренебрежимо мало по сравнению с изменением α , что является обоснованным в соответствии с результатами работы [12].

В процессе эксперимента проведены измерения как при начальном, после охлаждения образца, освещении, так и при последовательном воздействии излучением с различным спектральным составом.

3. Экспериментальные результаты

Экспериментальные результаты: спектр оптического поглощения $\alpha(\lambda)$ ИЖГ (кривая 1) и фотоиндуцированные спектры изменения коэффициента поглощения $\Delta\alpha(\lambda)$ (кривые 2–5) представлены на рисунке.

3.1. Образец ИЖГ(Ba). Первоначальное, после охлаждения образца, воздействие излучения с длинами волн $\Delta\lambda_{\text{IR}} = 1.5\text{--}2.0 \mu\text{m}$, когда $\Delta\lambda_{\text{IR}} > \lambda_{\text{SGN}}$

($\lambda_{SGN} = 1.15 \mu\text{m}$ на вставке кривая *a*), вызывает в ИЖГ (Ba) эффект одного знака — незначительное уменьшение поглощения во всем исследуемом интервале — кривая 2. Малая величина фотоиндуцированного изменения не позволяет описать профиль линии с большой точностью, однако в исследованном диапазоне не обнаружено возрастания коэффициента поглощения при воздействии излучения с длинами волн, большими λ_{SGN} .

При первичном коротковолновом воздействии $\Delta\lambda_{IR} = 0.65-0.9 \mu\text{m}$, когда $\Delta\lambda_{IR} < \lambda_{SGN}$, спектральная зависимость $\Delta\alpha(\lambda)$ в ИЖГ (Ba) становится знакопеременной (кривая 3): уменьшение α в интервале $0.70-0.83 \mu\text{m}$ и возрастание в ИК-области с максимумом положительно эффекта вблизи $1.0 \mu\text{m}$.

3.2. Образец ИЖГ:Si. При первоначальном воздействии излучения $\Delta\lambda_{IR} = 1.0-2.0 \mu\text{m}$, когда $\Delta\lambda_{IR} > \lambda_{SGN}$ ($\lambda_{SGN} \approx 0.9 \mu\text{m}$ на вставке кривая *b*), в кристалле ИЖГ:Si наблюдается уменьшение оптического поглощения во всем исследованном интервале $\Delta\alpha(\lambda) < 0$ (кривая 4). Фотоиндуцированный спектр имеет выраженные особенности: локальный максимум около $1.0 \mu\text{m}$ и дальнейшее возрастание отрицательного эффекта в области более коротких длин волн с максимумом на $0.7 \mu\text{m}$. При первоначальном коротковолновом воздействии $\Delta\lambda_{IR} = 0.65-0.9 \mu\text{m}$, когда $\Delta\lambda_{IR} < \lambda_{SGN}$, происходит образование знакопеременного фотоиндуцированного спектра (кривая 5).

При последовательном воздействии света из различных спектральных интервалов (относительно λ_{SGN}) наблюдаются следующие закономерности, общие для кристаллов ИЖГ:Si и ИЖГ(Ba): при первичном воздействии света из интервала с длинами волн $\Delta\lambda_{IR} > \lambda_{SGN}$ и последующем, вторичном, воздействии света с $\Delta\lambda_{IR} < \lambda_{SGN}$ первоначальные фотоиндуцированные спектры с эффектом одного знака (кривые 2, 4) трансформируются в знакопеременные спектры (кривые 3, 5). Последнее состояние нельзя изменить оптическим воздействием, оно изменяется при нагреве образцов до 300 К. Повторное коротковолновое воздействие, разрушая эффект „просветления“ на полосе с максимумом около $1.0 \mu\text{m}$, одновременно увеличивает отрицательный эффект около $0.7 \mu\text{m}$, т.е. спектрально-зависимые изменения знака эффекта происходят на полосе с максимумом около $1.0 \mu\text{m}$.

4. Обсуждение результатов

Фотоиндуцированное изменение оптического поглощения в $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ объясняется изменением концентрации иновалентных ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{4+}$ или их перераспределением относительно точечных (примесных) дефектов или дефектов решетки (вакансий) при освещении [2-4,8,9]. Особенности фотоиндуцированного спектра в этом случае определяются в основном собственным спектром примесных ионов. Авторы работы [12] на основании анализа формы фотоиндуцированных спектров и собственных спектров поглощения полагают, что

возрастание поглощения в гранатах $\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ связано с изменением вероятности собственных переходов „основных“ ионов Mn^{3+} вследствие влияния электрического поля (заряда) точечных дефектов (примесных ионов, вакансий). В работе [15] знакопеременный фотоиндуцированный спектр [5] объясняется перераспределением ионов Fe^{2+} и Fe^{4+} под действием света между октаэдрическими положениями с различными характеристиками локального кристаллического поля (знаками и значениями компонент поля).

Обсуждение фотоиндуцированных спектров, представленных в настоящей работе, проводится с привлечением экспериментальных результатов, полученных ранее в [6,13,14] на тех же кристаллах ИЖГ.

Сравнивая спектр поглощения октаэдрических ионов Fe^{3+} ИЖГ $\alpha(\lambda)$ (кривая 1) и фотоиндуцированные спектры $\Delta\alpha(\lambda)$ (кривые 2-5), можно отметить, что максимумы фотоиндуцированных спектров смещены в длинноволновую область относительно максимума собственного перехода ${}^6A_{1g} \rightarrow {}^4T_{1g}$ иона Fe^{3+} ($0.9 \mu\text{m}$). Форма этих спектров и положение фотоиндуцированных максимумов близки к спектрам, отражающим индивидуальный вклад примесных ионов в спектр поглощения. Собственный спектр примесных ионов является разностью спектров поглощения легированных и „эталонных“ кристаллов ИЖГ [16-18]. Это дает основание полагать, что фотоиндуцированное изменение α обусловлено изменением поглощения на иновалентных ионах или изменением их концентрации.

4.1. Воздействие света из области примесного поглощения ИЖГ ($\Delta\lambda_{IR} > \lambda_{SGN}$, кривые *a, b*). При начальном, после охлаждения в темноте, воздействии фотонов с энергией, меньшей полуширины запрещенной зоны $E_G/2$ ($E_G \approx 2.9 \text{eV}$), возможно изменение состояния тех примесных центров, которые образуют в запрещенной зоне электронные энергетические уровни с небольшой глубиной залегания.

В работе [3] детально исследована зависимость знака и величины фотоиндуцированного изменения поглощения от типа примеси (донор или акцептор) и концентрации примеси при освещении „белым светом“. Аналогичные эксперименты для исследованных в настоящей работе кристаллов ИЖГ:Si и ИЖГ(Ba) с учетом результатов работы [3] доказывают, что в кристалле ИЖГ:Si основной, доминирующей является донорная примесь (Si^{4+}), в ИЖГ(Ba) — основная примесь акцепторного типа (Ba^{2+}). Концентрация ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{4+}$ в кристалле до освещения определяется степенью компенсации основной примеси примесями (или вакансиями) с зарядом противоположного знака [1]. При охлаждении вследствие кулоновского притяжения ионы $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{4+}$ локализируются в „ближнем“ положении относительно примесных ионов $\text{Si}^{4+}/\text{Ba}^{2+}$, образуя связанные комплексы $(\text{Si}^{4+} - \text{Fe}^{2+})/(\text{Ba}^{2+} - \text{Fe}^{4+})$. Комплексы — неионизированные ловушки электронов/дырок с соответствующими локализованными уровнями в запрещенной зоне. Минимальная энергия оптической активации этих центров

в кристаллах ИЖГ:Si/ИЖГ(Ba) — 0.6/0.8 eV, минимумы энергии определяются длинноволновой границей области существования эффекта (1.9/1.6 μm) в спектре фотовозбуждения (кривые *b*, *a* на вставке).

Воздействие низкоэнергетического излучения на примесные центры вызывает их фотоионизацию и последующее перераспределение электронов/дырок в „дальнее“ положение или уменьшение количества ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{4+}$. Оба процесса приводят к уменьшению поглощения [3,4,16–18]. Если величина эффекта пропорциональна концентрации $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{4+}$, то из сравнения величины эффекта (кривых 2, 4) следует, что количество ионов Fe^{2+} в ИЖГ(Si) больше Fe^{4+} в ИЖГ(Ba). В ИЖГ(Ba) достигается более полная компенсация акцепторной примеси (Ba^{2+}), чем донорной (Si^{4+}) в ИЖГ(Si) (механизмы зарядовой компенсации в гранатах подробно рассмотрены, например, в [1]). Измерение удельного сопротивления при комнатной температуре свидетельствует в пользу этого положения: сопротивление ИЖГ(Ba) $\sim 10^9$ ($\Omega \cdot \text{cm}$) на порядок больше сопротивления ИЖГ(Si).

4.2. Воздействие света из области собственного поглощения ИЖГ ($\Delta\lambda_{\text{IR}} < \lambda_{\text{SGN}}$, кривые *a*, *b*). При воздействии света из области собственного поглощения ИЖГ изменение коэффициента оптического поглощения носит знакопеременный характер. При данных энергиях фотовоздействия происходит одновременное фотовозбуждение „основных“ ионов Fe^{3+} , скомпенсированных (до освещения) донорных и акцепторных уровней и ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{4+}$. При этом реализуются многвариантные возможности для обмена зарядами типа: зона–локальный центр между глубокими центрами генерации и центрами захвата [9].

Возрастание α на полосе с максимумом около 1 μm (кривые 3, 5) обусловлено образованием ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{4+}$, которые имеют в этой области собственные переходы с близкими по энергии значениями $\sim 10\,000\text{ cm}^{-1}$ (ионы Fe^{2+} и Fe^{4+} обладают сходной системой уровней) [1,15,17]. Образование нетрехвалентных ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{4+}$ следует ожидать среди тех ионов Fe^{3+} , которые испытывают достаточно сильное возмущение со стороны заряженных дефектов противоположного знака. Поэтому в кристалле ИЖГ(Ba) поляризационно-зависимый эффект изменения намагниченности ΔM_{\perp} в отличие от ИЖГ:Si возникает после предварительного экспонирования кристалла „белым светом“ [6], перераспределение ионов Fe^{4+} поляризованным светом возможно только после образования этих ионов.

Последовательное фотовоздействие приводит на первом этапе ($\Delta\lambda_{\text{IR}} > \lambda_{\text{SGN}}$) к перераспределению/уменьшению существующих (до освещения) ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{4+}$, а при последующем воздействии ($\Delta\lambda_{\text{IR}} < \lambda_{\text{SGN}}$) происходит образование нетрехвалентных ионов в поле заряженных дефектов. При формировании пар дефект–ион происходит понижение кулоновской ($\sim r^{-1}$) и упругой ($\sim r^{-3}$) энергии кристалла. Минимум

упругой энергии реализуется при образовании вблизи иона с большим радиусом иона с малым радиусом ($\text{Si}^{4+}-\text{Fe}^{2+}$, $\text{Ba}^{2+}-\text{Fe}^{4+}$) [20]. Для предложенной модели оба условия выполняются, и при освещении происходит понижение энергии кристалла в целом. После коротковолнового освещения реализуется равновесное распределение нетрехвалентных ионов относительно заряженных дефектов при данной температуре, и его можно изменить только повышением температуры.

Отрицательный $\Delta\alpha$ -эффект около 0.7 μm (кривые 2–5) наблюдается в спектре независимо от типа примеси и спектра оптического воздействия. Общими дефектами для исследованных образцов являются кислородные вакансии *V* с глубокими уровнями в запрещенной зоне. В зависимости от зарядового состояния (V^{++} , V^+ , V^0) вакансии при освещении могут служить центрами генерации электронов или являться глубокими ловушками, что усложняет анализ роли кислородных вакансий в фотоиндуцированных процессах. Наблюдаемое в различных образцах уменьшение поглощения связано с глубокими центрами, однако, для выяснения конкретного механизма влияния этих центров на оптическое поглощение необходима дополнительная информация о концентрации и зарядовом состоянии вакансий. Возможно, реализуется механизм, предложенный авторами [12]: при захвате фотоэлектрона на заряженную вакансию число ионов Fe^{3+} в сфере действия положительного заряда вакансии уменьшается, что приводит к уменьшению интенсивности собственных переходов этих ионов вблизи вакансий.

5. Заключение

Экспериментально исследован характер изменения коэффициента поглощения α в диапазоне 0.7–1.9 μm в фотомагнитных кристаллах ИЖГ с различным типом примеси под действием индуцирующего излучения различного спектрального состава. Показано, что при воздействии излучения из области примесного поглощения ИЖГ в диапазоне 0.7–1.9 μm наблюдается эффект одного знака — уменьшение коэффициента поглощения α , величина эффекта определяется концентрацией неионизированных ловушек. При воздействии излучения из области собственного поглощения ИЖГ спектральная зависимость $\Delta\alpha(\lambda)$ носит знакопеременный характер: возрастание поглощения в области примесного поглощения и уменьшение в области собственного поглощения. Спектрально-зависимое изменение знака эффекта происходит на широкой полосе с максимумом около 1 μm . Таким образом, особенности фотоиндуцированного изменения α в ИЖГ определяются не только природой точечных дефектов, но и спектром индуцирующего излучения, изменяя который возможно осуществить селективное воздействие на центры с различной энергией оптической активации.

Список литературы

- [1] В.В. Рандошкин, А.Я. Червоненкис. Прикладная магнитооптика. Энергоатомиздат, М. (1990). 320 с.
- [2] В.Ф. Коваленко, Э.Л. Нагаев. УФН **148**, 561 (1986).
- [3] E.M. Gyorgy, J.F. Dillon, J.P. Remeika. J. Appl. Phys. **42**, 4, 1454 (1971).
- [4] A. Tucciarone. Proc. Intern. school of physics Enrico Fermi: Course LXX. North Holland, Amsterdam (1978). P. 320.
- [5] K. Hisatake, I. Matsubara, K. Maeda, H. Yasuoka, H. Mazaki, K. Uematsu. J. Magn. Magn. Mater. **140-144**, 2127 (1995).
- [6] В.Г. Веселаго, Р.А. Дорошенко, С.Г. Рудов. ЖЭТФ **105**, 638 (1994).
- [7] R. Metselaar, V.A. Huyberts, H. Logmans. J. Appl. Phys. **46**, 3171 (1975).
- [8] M. Pardavi-Horvath, P. Wigen, G. Vertesy. J. Appl. Phys. **63**, 3110 (1988).
- [9] Н.Г. Находкин, В.В. Вознюк. ФТТ **31**, 114 (1989).
- [10] Р.А. Дорошенко, М.Д. Надеждин. ФТТ **38**, 3075 (1996).
- [11] V.A. Bedarev, S.L. Gnatchenko, R.A. Rupp, B. Sugg. ФНТ **24**, 281 (1998).
- [12] V.V. Eremenko, S.L. Gnatchenko, I.S. Kachur, V.G. Piryatinskaya, A.M. Ratner, V.V. Shapiro, M. Fally, R.A. Rupp. ФНТ **27**, 30 (2001).
- [13] Р.А. Дорошенко. Труды ИОФАН **44**, 105 (1992).
- [14] Р.А. Дорошенко, М.Д. Надеждин. ФТТ **43**, 1233 (2001).
- [15] Z.V. Gareyeva, R.A. Doroshenko. J. Magn. Magn. Mater. **268**, 1 (2004).
- [16] G.B. Scott, J.L. Page. Phys. Stat. Sol. (b) **79**, 203 (1977).
- [17] А.М. Балбашов, В.Е. Бахтеузов, А.А. Цветкова, А.Я. Червоненкис, А.П. Черкасов. ЖПС XXXIV, 537 (1981).
- [18] J.F. Dillon, E.M. Gyorgy, J.P. Remeika. J. Appl. Phys. **41**, 1211 (1970).
- [19] Ж.В. Гуменюк-Сычевская, В.Ф. Коваленко, С.Н. Ляхимец. ФТТ **28**, 675 (1986).
- [20] М. Ланно, Ж. Бургуен. Точечные дефекты в полупроводниках. Теория. Т. 1. Мир, М. (1984). 264 с.