

ОПТИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ ПЛЕНОЧНЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА**В. Р. Соболев^{а*}, Т. В. Волчик^а, С. М. Арабей^а,
Б. В. Корзун^б, Н. А. Каланда^б**

УДК:537.312.62;541.123.3:548

^а Белорусский государственный аграрный технический университет,
220023, Минск, просп. Независимости, 99; e-mail: arabei@imaph.bas-net.by^б Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск

(Поступила 24 июля 2008)

Анализируются спектры светоослабления пленочных монокристаллических структур на основе железиттриевого граната, выращенного на подложке из галлий-гадолиниевого граната методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора в расплаве, которые сопоставляются со спектрами объемных образцов железиттриевого граната. Рассчитанные оптические постоянные обсуждаются с учетом воздействия кристаллического поля на расщепление энергетических уровней ионов железа в пленочных образцах.

Ключевые слова: спектр светоослабления, пленочная монокристаллическая структура, железиттриевый гранат, галлий-гадолиниевый гранат, оптические постоянные, энергетическое состояние иона.

Light attenuation spectra of single-crystal film structures from yttrium iron garnet grown on a gallium gadolinium garnet substrate by liquid-phase epitaxy from the undercooled solution in the melt have been studied and compared with those of bulk yttrium iron garnet samples. The calculated optical constants are discussed taking into account the influence of crystal field on the splitting of energetic states of iron ions in film samples.

Keywords: light attenuation spectrum, single-crystal film structure, yttrium iron garnet, gallium gadolinium garnet, optical constants, energetic state of ion.

Введение. Одно из направлений развития современного материаловедения — разработка и совершенствование технологии синтеза пленочных структур на основе уже известных соединений. К традиционным материалам, актуальным для решения многих практических задач, относятся железиттриевый гранат ($Y_3Fe_5O_{12}$) и родственные ему соединения. Этот класс материалов, открытый около полувека назад, привлекателен тем, что, являясь магнитным диэлектриком, сочетает свойства, позволяющие находить широкое применение в системах обработки информации [1—10]. Наличие в структуре граната трех катионных позиций разных размеров, существующих в кубической плотной упаковке из сравнительно больших анионов кислорода, дает возможность вводить в состав многие химические элементы замещения. При этом достаточно сложная химическая структура и большое количество атомов в элементарной ячейке, включающей восемь формульных единиц, позволяют модифицировать свойства материала применительно к тому или иному виду использования, в частности для систем магнитооптики. Так, замещение

OPTICAL CONSTANTS OF SINGLE-CRYSTAL FILM STRUCTURES FROM THE YTTRIUM IRON GARNET**V. R. Sobol^{а*}, T. V. Volchik^а, S. M. Arabei^а, B. V. Korzun^б, and N. A. Kalanda^б** (^а Belarusian State Agrarian Technical University, 99 Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus; e-mail: arabei@imaph.bas-net.by;^б Scientific-Practical Materials Research Center, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk)

некоторой доли ионов иттрия на ионы висмута приводит к усилению эффекта фарадеевского вращения. Существенно, что характер оптических свойств материала в значительной степени определяется присутствием в структуре ионов железа, которые при наличии неизовалентных примесей могут находиться и в нестандартном зарядовом состоянии [5—12]. Примесные атомы обычно попадают в состав материала в процессе синтеза при увеличении скорости роста, приводящей к нарушению квазиравновесия. С другой стороны, даже направленное замещение ионов с целью улучшения определенных свойств неизбежно приводит к повышению уровня дефектности материала и может при этом воздействовать на некоторые другие характеристики. Как известно, для систем обработки информации на основе эффекта Фарадея требуются материалы со значительной оптической активностью при низком уровне поглощения излучения в светочувствительной структуре. В связи с этим проблема воздействия дефектов кристаллической решетки на оптические постоянные железойттриевого граната остается актуальной, особенно в свете совершенствования технологии синтеза тонкопленочных структур.

О прозрачности железойттриевого граната в области $\lambda = 1\text{—}9$ мкм сообщалось еще в 1958 г. [1]. В дальнейших исследованиях установлено, что этот материал исключительно хорошо пропускает излучение в диапазоне $1.1\text{—}5.0$ мкм, а в области более коротких длин волн, где сказываются электронные переходы между состояниями ионов железа [1—4], поглощение усиливается. Для повышения эффективности применения указанного материала в оптических устройствах целесообразно сместить границу пропускания в видимую область, что возможно в схемных решениях на основе легированных пленочных структур как за счет ослабления общего поглощения на малых оптических длинах [5—7], так и за счет уменьшения поглощения, вызванного изменением химического состава материала. В настоящее время информация по частотной зависимости коэффициента поглощения и показателя преломления объемных монокристаллов $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ несколько противоречива и не соответствует данным для тонкопленочных слоев этого материала. Пленочные структуры могут отличаться по своим физическим свойствам от объемных образцов вследствие воздействия самой поверхности подложки (как двумерного дефекта) на структуру материала.

В настоящей работе измерены и проанализированы спектры светоослабления пленочных монокристаллических структур железойттриевого граната в области $0.6\text{—}2.0$ мкм. Учтено влияние толщины структуры на интенсивность прошедшего излучения, и по результатам эксперимента рассчитаны спектральные зависимости коэффициента поглощения, вещественной и мнимой компонент показателя преломления. Обсуждаются возможности управления оптическими постоянными материалов для достижения высоких параметров оптической добротности, прежде всего за счет снижения потерь лучистой энергии в коротковолновом диапазоне.

Методика эксперимента. В качестве объектов исследования выбраны пленочные монокристаллические образцы $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Для сопоставления изучены и проанализированы оптические свойства серии объемных монокристаллов железойттриевого граната толщиной $1\text{—}3$ мм, синтезированных методом динамической направленной кристаллизации на затравку из раствора в расплаве. Пленочные монокристаллические структуры выращены методом жидкофазной эпитаксии на подложках из галлий-гадолиниевого граната ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) [12]. Для исследования выбраны три серии образцов (общее количество 20), выращенных на одинаковой подложке толщиной 140 мкм. В сериях образцов разброс общей с подложкой толщины отвечал диапазону $160\text{—}180$ мкм. Общие размеры определялись обычным микрометром с приемлемой точностью измерения (5 мкм). Изменение толщины пленок в пределах $20\text{—}40$ мкм сказывалось на спектрах светоослабления и использовалось для расчета оптических характеристик.

Для контроля кристаллической структуры пленок применен фазовый анализ, который проведен на автоматизированном рентгеновском аппарате ДРОН-3 (медное K_α -излучение, $\lambda_{\alpha 1} = 1.540562 \text{ \AA}$, $\lambda_{\alpha 2} = 1.544398 \text{ \AA}$, время экспозиции $2\text{—}3$ с, шаг сканирования равен двойному углу $2\theta = 0.04^\circ$). Угловые положения максимумов дифракционных рефлексов определены по центрам тяжести их площадей.

Регистрация спектров ослабления излучения образцами осуществлена на спектрофотометре Cary-500 Scan в виде спектральной зависимости оптической плотности D (десятичного логариф-

ма отношения интенсивностей падающего и прошедшего через образец излучения I_0 и I). Расчет оптических постоянных проведен в приближении формализма закона Бугера, количественно описывающего уменьшение интенсивности плоской монохроматической световой волны при ее распространении в поглощающей среде. Такой подход коррелирует с методикой расчета коэффициента поглощения материала пленки по данным последовательной регистрации интенсивности (оптической плотности) в спектре светоослабления непосредственно подложки и подложки с нанесенной на нее пленочной структурой. Если интенсивность прошедшего через подложку излучения разделить на интенсивность излучения, прошедшего через подложку с нанесенной пленкой, и взять натуральный логарифм от полученного частного, то при определенных условиях, включающих знание толщины пленки, легко вычислить коэффициент поглощения материала пленки. В частности, упомянутая методика используется для изучения линий поглощения в спектре гомоэпитаксиальных пленок галлий-гадолиниевого граната, легированного редкоземельными ионами [13, 14]. Метод расчета, основанный на вычислении отношения интенсивностей в спектрах светоослабления, базируется на том, что при малых количествах лигатуры в позициях замещения вкладом дополнительных поверхностей раздела в оптическом сигнале можно пренебречь.

Результаты эксперимента и их обсуждение. На рис. 1 приведена рентгеновская дифрактограмма тонкопленочного слоя $Y_3Fe_5O_{12}$, которая свидетельствует о монокристалличности материала. Параметр решетки, рассчитанный как среднее арифметическое из значений, определенных по положению высокоугловых рефлексов (660) и (880), равен 1.2373 ± 0.0005 нм, что соответствует литературным данным [15]. Как следствие, расстояние между структурными атомами материала $Y_3Fe_5O_{12}$ немного меньше, чем расстояние между атомами материала подложки $Gd_3Ga_5O_{12}$ (1.2383 нм).

Согласно рис. 2, на котором представлены спектры светоослабления некоторых объектов исследования, оптическая плотность объемных и пленочных образцов $Y_3Fe_5O_{12}$ в области 1.1—2.0 мкм мала (кривые 1—3) и близка к величине D для $Gd_3Ga_5O_{12}$ -подложки (кривая 4). Как следует из эксперимента, наличие дополнительных границ раздела у пленочной структуры незначительно сказывается на интенсивности прошедшего света в этой спектральной области. Это можно объяснить близостью параметров решетки материалов подложки и пленки, что (даже с учетом незначительного влияния поглощения на составляющие показатели преломления) приводит к малому различию вещественных составляющих показателей преломления этих материалов. Важно отметить, что в области $\lambda < 1.6$ мкм объемный образец $Y_3Fe_5O_{12}$ пропускает излучение.

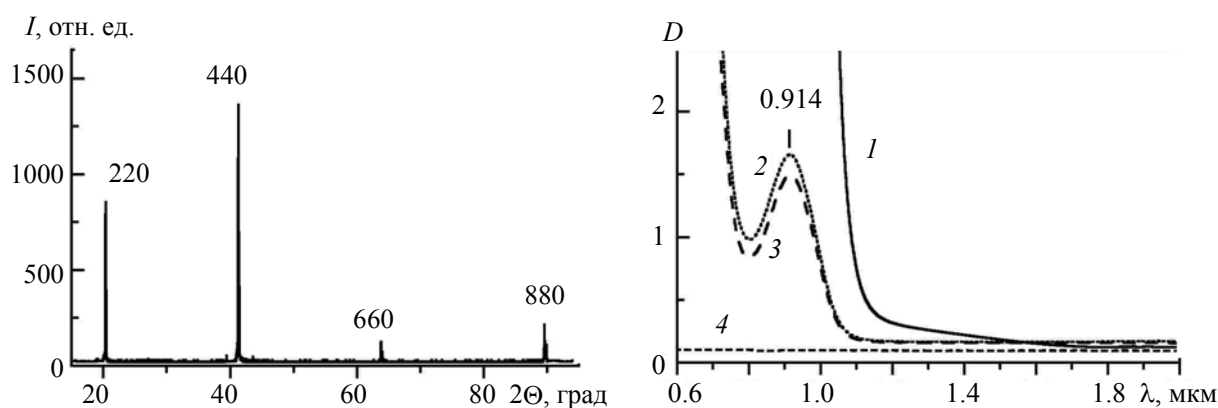


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма тонкой пленки железиттриевого граната на $Gd_3Ga_5O_{12}$ -подложке

Рис. 2. Спектры светоослабления монокристаллического железиттриевого граната (1—3) и $Gd_3Ga_5O_{12}$ -подложки (4): 1 — объемный образец толщиной 2.6 мм; 2, 3 — пленочные слои $Y_3Fe_5O_{12}$ на $Gd_3Ga_5O_{12}$ -подложке с общей толщиной 180 и 160 мкм

ние хуже тонкопленочных слоев этого материала. Ясно, что бóльшая оптическая плотность объемного образца в этой области обусловлена дефектами структуры, которые при одинаковой их концентрации сильнее ослабляют проходящее излучение в объемном образце за счет бóльшей оптической длины. В еще более коротковолновой области ($\lambda < 1.1$ мкм) спектр светоослабления исследуемых образцов формируется, как отмечалось выше, переходами между электронными состояниями ионов железа.

В общем случае интенсивность как отраженного, так и прошедшего излучения определяется комплексным показателем преломления с учетом относительного веса его вещественной и мнимой составляющих. Для материала, не обладающего остаточной намагниченностью, выражение для показателя преломления, соответствующий вид коэффициентов отражения и пропускания определяются только диэлектрическими свойствами [16, 17]. Как известно, диэлектрическая проницаемость материала характеризует его способность реагировать на электрическую составляющую поля волны. На бесконечно больших частотах запаздывание отклика среды на внешнее возмущение исчезает, среда становится прозрачной независимо от того, проводит она или не проводит электрический ток. К примеру, для проводящих материалов-металлов в области частот, много бóльших частоты плазменных колебаний, диэлектрическая проницаемость стремится к единице, а для частот ниже плазменной частоты, отвечающих видимой области спектра, она отрицательна, поскольку в этом диапазоне материал сильно поглощает. Соответственно, показатель преломления в видимой области является мнимой величиной, что отвечает высокой отражательной способности. С другой стороны, гипотетический, идеальный диэлектрик с вещественным показателем преломления ≈ 10 даже при полном отсутствии поглощения не пропускает 70 % излучения за счет его отражения на границе раздела с воздухом.

В связи с этим для материала подложки из галлий-гадолиниевого граната, оптически прозрачного начиная с УФ диапазона, значение вещественной составляющей показателя преломления, близкое к двум, в определенной степени влияет на условия прохождения излучения через границу раздела подложка—воздух или подложка— $Y_3Fe_5O_{12}$ [18]. Поскольку в данном случае материалы пленок и подложек разные, метод взятия логарифма от отношения интенсивностей излучения, прошедшего непосредственно через подложку и через пленочную структуру, корректировался с учетом различных свойств материалов. Поэтому при вычислении дисперсии показателя преломления и коэффициента поглощения использованы выражения для интенсивности прошедшего излучения при наличии двух (подложка) и четырех границ раздела (пленочная структура) соответственно [19]:

$$I = I_0(1 - R)^2 e^{-\alpha d}, \quad (1)$$

$$I = I_0(1 - R)^2(1 - R')^2 e^{-\alpha' d'} e^{-\alpha d},$$

где R и R' — коэффициенты отражения на границах раздела воздух—подложка (гранат) и гранат—подложка; α , α' и d , d' — коэффициенты поглощения и толщины $Gd_3Ga_5O_{12}$ -подложки и $Y_3Fe_5O_{12}$ -пленки. В развернутом виде соотношения, используемые для расчета спектральных зависимостей оптических констант, выглядят так:

$$D = \frac{l}{\ln 10} \left[-2 \ln \frac{4n}{n^2 + 2n + 1 + k^2} + \frac{4\pi}{\lambda} kd \right], \quad (2)$$

$$D = \frac{l}{\ln 10} \left[-2 \ln \frac{4n}{n^2 + 2n + 1 + k^2} - 2 \ln \frac{4(nn' + kk')}{(n + n')^2 + (k + k')^2} + \frac{4\pi}{\lambda} kd + \frac{4\pi}{\lambda} k'd' \right],$$

где n , n' и k , k' — вещественные и мнимые составляющие показателя преломления подложки и железиттриевого граната.

Определив спектральные зависимости оптических констант подложки с использованием данных по оптической плотности пленочных структур различной толщины, мы рассчитали коэффициенты поглощения, вещественную и мнимую составляющие показателя преломления пленочных монокристаллических структуры $Y_3Fe_5O_{12}$ -граната (рис. 3).

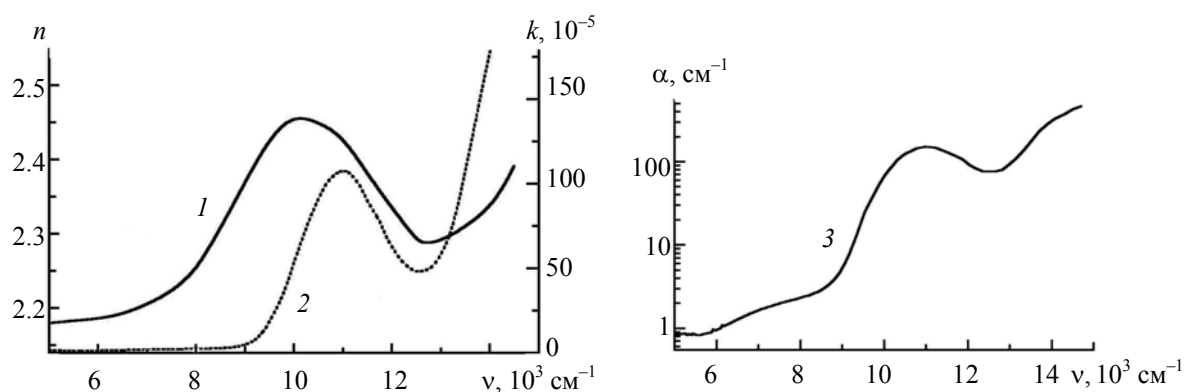


Рис. 3. Спектральные зависимости вещественной (1) и мнимой (2) составляющих комплексного показателя преломления и коэффициента поглощения (3) тонкопленочного железиттриевого граната

При анализе влияния структуры пленки железиттриевого граната на его оптические свойства целесообразно сопоставить свойства этого материала с характеристиками $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, который является материалом такого же класса по структуре и прозрачности в области 1.3—2.0 мкм. Для галлий-гадолиниевого граната (подложки), не имеющего полос поглощения во всей исследованной области длин волн (рис. 2, кривая 4), можно легко определить коэффициент поглощения и компоненты показателя преломления исходя из оптической плотности $D = 0.09$ и его толщины. Условие совместимости соотношения (2) для материала подложки выполняется при $n \approx 1.85$, $k \approx 10^{-6}$. Вычисленное значение k эквивалентно коэффициенту поглощения $\alpha \approx 0.2 \text{ см}^{-1}$ и коррелирует с литературными данными [18]. Вещественная составляющая показателя преломления $n \approx 1.85$ несколько меньше литературного значения 1.94 [18]. Дисперсия оптических постоянных материала подложки незначительна, значения n и α медленно возрастают в коротковолновой области.

Согласно результатам расчета, вещественная составляющая показателя преломления железиттриевого граната обнаруживает поведение, отвечающее нормальной дисперсии, которая при $\nu > 10000 \text{ см}^{-1}$ трансформируется к аномальному типу, что подтверждает действие механизма резонансного поглощения энергии излучения. Отметим, что в спектральной области, где активизируются электрические дипольные переходы, значения n сравнительно слабо влияют на интенсивность прошедшего света, ослабление которого определяется преимущественно мнимой компонентой k . По аналогии с акустическими волнами, у которых консервативные и диссипативные составляющие механизма передачи энергии от поля к среде и обратно относятся к процессам упругой и пластической деформации элементов среды, в случае распространения электромагнитных волн за процесс упругих взаимодействий отвечает вещественная часть показателя преломления, описывающая обратимые процессы обмена энергией. Необратимые явления, приводящие к затуханию волны, связаны с наличием дефектов структуры и резонансным поглощением, сопровождаемым переходами между уровнями с конечным временем жизни. В области прозрачности конечность скорости процессов обмена энергией между полем и средой приводит к уменьшению скорости распространения волны по сравнению с вакуумом.

В железиттриевом гранате коротковолновая граница ($\lambda \approx 1.1 \text{ мкм}$) области прозрачности, как упоминалось выше, формируется за счет наличия в химической структуре ионов железа, которые занимают искаженные октаэдрические и тетраэдрические позиции внутри многогранников, образованных ионами кислорода. В элементах группы железа $3d$ -оболочка, обуславливающая парамагнетизм ионов, лежит довольно неглубоко. При слабом влиянии трансляционной симметрии на расположение энергетических уровней величина внутреннего поля достаточна, чтобы классифицировать его как промежуточное, под действием которого расщепление уровней больше расстояния между различными мультиплетами. В таком приближении связь между векторами орбитального и спинового моментов пренебрежимо мала и энергией спин-орбитального

взаимодействия можно пренебречь. Подуровни в количестве $2L + 1$ (L — орбитальный момент количества движения), вырожденные в уединенном ионе Fe^{3+} , во внутреннем поле расщепляются. По сути это означает, что симметрия гамильтониана изолированного иона Fe^{3+} , отвечающая непрерывной группе трехмерных вращений и отражений, уменьшается под действием возмущения окружающих ионов. Количество расщепленных подуровней определяется в рамках процедуры так называемого разложения неприводимых представлений группы вращений и отражений на неприводимые представления конечной группы, описывающей симметрию поля в данной точке. Ион Fe^{3+} , как известно, содержит пять d -электронов. Его энергетические состояния в соответствии с правилом Хунда располагаются в последовательности 6S , 4G , 4D , 4S , 2J , 2G , 2P и т. д. В кристалле вырождение перечисленных уровней частично снимается, и они расщепляются в соответствии с разложением неприводимых представлений бесконечной группы сферической симметрии (см., например, [20, 21]). Как известно, в поле октаэдрической симметрии атомные термы S -и P -типов не расщепляются, так что уровень основного состояния иона железа остается вырожденным. Отметим, что для ионов железа поля октаэдрических и тетраэдрических конфигураций действуют неидентично и снимают вырождение возмущенных уровней в неодинаковой степени. Поскольку кристаллическое поле октаэдрических позиций больше, а симметрия его выше, чем у тетраэдрических позиций, появление электронных энергетических состояний трехзарядового иона железа начинается с позиций, окруженных шестью анионами. В частности, первое возбужденное состояние 4G расщепляется (следуя терминологии Баукарта, Вигнера) на Γ_{15}' -, Γ_{25}' -, Γ_{12} - и Γ_1 -уровни, понижение симметрии состояния 4D приводит к появлению двух Γ_{25}' - и Γ_{12} -уровней, состояние 4S , как сказано выше, не расщепляется и обозначается Γ_1 , и т. д. Коротковолновая граница области максимальной прозрачности формируется за счет электрических дипольных переходов ионов железа между основным Γ_1 - и первым возбужденным Γ_{15}' -состояниями. Согласно [4—6], максимум соответствующей полосы поглощения расположен при 917.4 нм. По полученным в настоящей работе результатам этому переходу отвечает полоса с $\lambda_{\text{max}} = 914.0$ нм (рис. 2). Наблюдаемое спектральное смещение полосы естественно связать с действием кристаллического окружения на ионы железа.

В пленочной структуре как системе, находящейся в более неравновесном состоянии, чем объемный образец, искажения кислородных октаэдров и тетраэдров должны смещать положения уровней энергии и увеличивать силу оптических осцилляторов переходов. Определить масштаб изменения коэффициента поглощения пленочного образца по сравнению с объемным не представляется возможным ввиду большой толщины последнего. Тем не менее появление дополнительного поглощения в пленочной структуре не вызывает сомнений. Вместе с тем дополнительные напряжения в пленочной структуре и искажение формы кислородных октаэдров могут как уменьшать, так и увеличивать частоту перехода из основного в первое возбужденное состояние. Из результатов эксперимента следует, что в пленочной структуре расщепление 4G -состояния уменьшается, и его естественно связать с влиянием поверхности и границы раздела. Неполное совпадение параметров кристаллических решеток подложки и материала пленочного образца $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, вероятно, приводит к тому, что от границы раздела до свободной поверхности пленки существует своеобразный градиент постоянной решетки пленки. Искажение распространяется на значительную часть элементарных ячеек в пленке, и рассогласование параметров решеток порядка 0.1 % приводит к сжатию кислородных октаэдров, означающему удаление анионов, лежащих в основании четырехгранной призмы, от катиона железа. Это приводит к увеличению коэффициента поглощения при некотором ослаблении степени расщепления уровней ионов железа, существующего у кислородных октаэдров в объемных образцах. Наблюдаемое увеличение частоты Γ_1 — Γ_{15}' -перехода означает, по сути, уменьшение эффективности кристаллического поля.

Заключение. Посредством регистрации спектров ослабления света выявлены закономерности дисперсии показателя преломления пленочных структур железиттриевого граната в области частот, отвечающей переходам в возбужденное состояние трехзарядовых ионов железа. Показано, что в пленочной структуре расщепление первого возбужденного уровня энергии иона железа уменьшается из-за ослабления искажения кислородных октаэдров, возможно, по причине замещения малой доли ионов железа на бор и/или образования вакансий кислорода в ходе синтеза.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф08-262).

- [1] C.S.Porter, E.G.Spenser, R.Gr.Le Crow. *J. Appl. Phys.*, **29** (1958) 495—498
- [2] R.Gr.Le Crow, D.L.Wood, Z.F.Dillon, J.F.Remeika. *Appl. Phys. Lett.*, **7** (1965) 27—30
- [3] D.L.Wood, J.P.Remeika. *J. Appl. Phys.*, **38** (1967) 1038—1045
- [4] Г.С.Кринчик, М.В.Четкин. *УФН*, **98** (1969) 3—25
- [5] G.B.Scott, D.E.Jacklison, J.L.Page. *Phys. Rev.*, **10** (1974) 971—985
- [6] P.Larsen, J.Robertson. *Appl. Phys.*, **11** (1976) 259—263
- [7] P.Larsen, J.Robertson. *J. Appl. Phys.*, **45** (1974) 2867—2873
- [8] А.М.Балбашов, В.Е.Бахтеузов, А.А.Цветкова, А.Я.Червоненкис, А.П.Черкасов. *Журн. прикл. спектр.*, **34**, № 3 (1981) 537—539
- [9] В.В.Рандошкин, А.Я.Червоненкис. *Прикладная магнитооптика*, Москва, Энергоатомиздат (1990) 36—55
- [10] В.В.Рандошкин, Н.В.Васильева, А.М.Салецкий, Н.Н.Сысоев. *Письма в ЖТФ*, **25** (1999) 18—22
- [11] Yu.P.Vorob'ev, O.Yu.Goncharov, V.V.Fetisov. *Crystallogr. Rep.*, **45** (2000) 971—975
- [12] В.В.Федотова, А.П.Гесь, Г.Л.Бычков. *Актуальные проблемы физики твердого тела*. Сб. ст., Минск, Изд. центр Бел. гос. ун-та (2003) 568—572
- [13] А.С.Москвин, А.В.Зенков. *ФТТ*, **44** (2002) 1811—1818
- [14] L.E.Helseth, R.W.Hasen, E.I.I'yashenko, M.Baziljevich, T.H.Johanse. *Phys. Rev. B*, **64** (2001) 174406-1—174406-6
- [15] A.Nakatsuka, A.Yoshiasa, S.Takeno. *Acta Crystallogr. B: Struct. Sci.*, **51** (1995) 737—739
- [16] Н.В.Васильева, В.В.Рандошкин, В.Н.Колобанов, Е.Б.Крюкова, В.В.Михайлин, Н.Н.Петровнин, В.Г.Плотниченко, Ю.Н.Пырков, Д.А.Спасский, Н.Н.Сысоев. *ФТТ*, **49** (2007) 460—464
- [17] А.В.Бабушкин, В.Д.Бучельников, И.В.Бычков. *ФТТ*, **44** (2002) 2183—2188
- [18] В.В.Рандошкин, Н.В.Васильева, В.Г.Плотниченко, Ю.Н.Пырков, С.В.Лаврищев, М.А.Иванов, А.А.Кириухин, А.М.Салецкий, Н.Н.Сысоев. *ФТТ*, **46** (2004) 1001—1007
- [19] М.Борн, Э.Вольф. *Основы оптики*, Москва, Наука (1973) 175—180
- [20] Ф.Бассани, Дж.Пастори Парравичини. *Электронные состояния и оптические переходы в твердых телах*, Москва, Наука (1982) 15—50
- [21] Р.Нокс, А.Голд. *Симметрия в твердом теле*, Москва, Наука (1970) 45—108