

УДК 544.015.4

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВИСМУТА НА СТАБИЛЬНОСТЬ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СО СТРУКТУРОЙ ГРАНАТА $(R,Bi)_3(Fe,M)_5O_{12}$ ($R - Ln$ или Y , $M - Ga$ или Al)

© 2019 г. М. Н. Смирнова¹, *, Г. Д. Нипан¹

¹Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, Россия, 119991 Москва, Ленинский пр., 31

*e-mail: smirnova_macha1989@mail.ru

Поступила в редакцию 09.07.2018 г.

После доработки 18.01.2019 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

На основе опубликованных экспериментальных работ оценена возможность введения висмута в многокомпонентные твердые растворы со структурой граната $(R,Bi)_3(Fe,M)_5O_{12}$, где $R - Ln$ или Y , $M - Ga$ или Al , при использовании различных методик синтеза. Показано, что существующие способы нанесения пленок и покрытий $(R,Bi)_3(Fe,M)_5O_{12}$ не обеспечивают воспроизводимость их химического состава и фазовую стабильность.

Ключевые слова: многокомпонентные оксидные системы, висмутовые феррогранаты

DOI: 10.1134/S0002337X19070194

ВВЕДЕНИЕ

Монокристаллические пленки, для которых отсутствуют объемные аналоги, находятся в метастабильном состоянии, и их разрушение с течением времени может произойти даже при незначительных колебаниях температуры и давления в результате образования стабильных фаз. Висмутовый феррогранат $Bi_3Fe_5O_{12}$ (BIG), представляющий интерес для магнитооптики, не существует в виде 3D-кристаллитов. Тем не менее, на подложках с гранатовой структурой происходит образование пленок и покрытий BIG при использовании методик физического распыления (ионно-лучевого IBS, высокочастотного RFS, высокочастотного магнетронного RFMS, электрон-циклотрон-резонансного ECR и импульсного лазерного PLD) или химического разложения (насыщенного пара mCVD и металлоорганического раствора MOD). Даже в рамках одной методики, соотношение $Bi : Fe$ в пленках BIG может значительно отклоняться от стехиометрического 3 : 5, что создает проблему заданного химического состава и, следовательно, воспроизводимости физических свойств, а увеличение толщины монослоя и удаление от подложки приводят к разрушению пленки. Более того, срок “жизни” каждой отдельной пленки BIG не определен и зависит от способа получения.

Один из способов стабилизации висмутосодержащих феррогранатов связан с созданием твер-

дых растворов $(R,Bi)_3(Fe,M)_5O_{12}$, где $R -$ лантаноиды Ln или Y , $M - Al$ или Ga .

Цель и главная тема настоящего обзора – определение возможности получения стабильных 2D-пленок и 3D-кристаллитов заданного состава $(R,Bi)_3(Fe,M)_5O_{12}$.

ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ $(Ln,Bi)_3(Fe,M)_5O_{12}$

Беспримесные феррогранаты $La_3Fe_5O_{12}$ и $Ce_3Fe_5O_{12}$ не образуются из-за больших ионных радиусов La^{3+} и Ce^{3+} . Образцы $LaBi_2Fe_5O_{12}$ в результате твердофазных реакций (SSR) при 900°C кристаллизуются в структуре разупорядоченного перовскита $(La,Bi)FeO_3$ с примесью пироклорной фазы (~2%) [1], и содержание висмута в перовските ограничивается составом $La_{0.3}Bi_{0.7}FeO_3$ [2]. Пленки со структурой граната $Ce_{2.2}Bi_{0.8}Fe_5O_{12}$ получены методом PLD на подложках $Gd_3Ga_5O_{12}$ в атмосфере аргона при температуре 700°C [3].

В ряду феррогранатов от Pg до Lu , исключая радиоактивный Pm , возможность замещения лантаноида на Bi зависит от выбора метода синтеза. С помощью MOD после отжига при 700°C получены пленки составов $NdBi_2Fe_5O_{12}$, $Nd_{0.5}Bi_{2.5}Fe_5O_{12}$ и $Nd_{0.5}Bi_{2.5}Fe_{5-y}Ga_yO_{12}$ ($y = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$) на буферном слое $Nd_2BiFe_4GaO_{12}$, нанесенном на стекло или $Gd_3Ga_5O_{12}$ [4]. В результате SSR (1200 и 1400°C) на воздухе синтезированы стабильные

кристаллиты $\text{Sm}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x = 0.0, 0.1, 0.3, 0.5$) [5]. При LPE из растворов-расплавов $\text{PbO}-\text{Bi}_2\text{O}_3$ и $\text{PbO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ на подложке $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ $\langle 111 \rangle$, легированной Ca и Mg/Zr, закристаллизованы пленки $\text{Eu}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x = 0, 0.27, 1, 1.3$) [6]. Из расплава $\text{Gd}_2\text{O}_3-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{V}_2\text{O}_5$ при охлаждении от 1100–1200°C выращены кристаллы $\text{Gd}_{1.95}\text{Bi}_{0.97}\text{Fe}_{5.1}\text{O}_{12}$ [7], а методом LPE ($\text{PbO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$) на подложке $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ($\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$) получена пленка $\text{Gd}_{2.22}\text{Bi}_{0.78}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [8]. Поликристаллические образцы $\text{Tb}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25$) синтезированы по золь-гель (SG) методике с последующим отжигом при 900°C [9], а монокристаллы $\text{Tb}_{2.75}\text{Bi}_{0.25}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ — из расплава (охлаждение от 1310 до 1200°C со скоростью 0.5°C/ч) при использовании Bi_2O_3 , BaCO_3 и B_2O_3 в качестве флюса [10]. Пленки $\text{Dy}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x = 1.27 \pm 0.03$) получены методом LPE ($\text{PbO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$) в интервале температур 730–930°C на подложках $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ($\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$), легированных Ca и Zr [11]. Кристалл $\text{Ho}_{2.587}\text{Bi}_{0.413}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ выращен по методике TSSG из расплава на основе Bi_2O_3 при использовании затравки $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ [12], а однофазные поликристаллы $\text{Ho}_2\text{BiFe}_5\text{O}_{12}$ синтезированы SG-методом (отжиг при 900°C) [13].

Наряду с прочими кристаллами ряда $\text{R}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{15}$ ($\text{R} = \text{Gd} \dots \text{Lu}$; $x = 0.8-1.0$), выращенными из расплава Bi_2O_3 , охлажденного от 1310 до 980–1050°C, получен $\text{Er}_{2.2}\text{Bi}_{0.8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [14]. Близкие величины замещения реализуются для гранатов $\text{Tm}_{3-x-y}\text{Bi}_x\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ ($0 < x \leq 0.83, 0 \leq y \leq 1.57$), полученных методом LPE на подложках $\text{R}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ $\langle 111 \rangle$ [15]. Соответственно, по методике TSSG (расплав Bi_2O_3 с добавкой PbO и затравка $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) выращен кристалл $\text{Yb}_{2.33}\text{Bi}_{0.67}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [12]. Методом LPE из расплава Bi_2O_3 при охлаждении от 1000 до 800–810°C на подложке $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ получена пленка $\text{Lu}_{2.1}\text{Bi}_{0.9}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [16]. Самые маленькие катионы Lu и Yb используются совместно с другими лантоноидами. Применение LPE для нанесения на подложку $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ пленок состава $(\text{GdLuBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ [17] приводит к их структурной и концентрационной неоднородности, например, изменению состава по толщине пленки [18]. Получение “монокристаллов” $\text{Gd}_{4/3}\text{Yb}_{2/3}\text{BiFe}_5\text{O}_{12}$ с помощью LPE вызывает ряд методических вопросов [19]. Монокристаллы невоспроизводимых составов $\text{Tb}_{0.85}\text{Yb}_{1.62}\text{Bi}_{0.53}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Tb}_{0.91}\text{Yb}_{1.38}\text{Bi}_{0.71}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и $\text{Tb}_{2.13}\text{Yb}_{0.53}\text{Bi}_{0.34}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ выращены из расплава, охлажденного со скоростью 0.5–1°C/ч от 1290 до 980°C, с использованием флюса $\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ [20]. При совместном RF-распылении таблеток брутто-состава $\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ на подложку, подогретую до 500°C, и последующем отжиге при 670–700°C получена пленка $\text{Dy}_{0.6}\text{Yb}_{0.5}\text{Bi}_{1.9}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [21].

ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ $(\text{Y,Bi})_3(\text{Fe,M})_5\text{O}_{12}$

Феррогранаты $(\text{Y,Bi})_3(\text{Fe,M})_5\text{O}_{12}$ обладают более устойчивой структурой по сравнению с $(\text{Ln,Bi})_3(\text{Fe,M})_5\text{O}_{12}$, что позволяет сохранять в них более высокое содержание Bi. С помощью LPE выращены монокристаллические пленки $\text{Y}_{1.65}\text{Bi}_{1.35}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ $\langle 111 \rangle$ (подложки $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ и $\text{Nd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) [22], тем не менее использование IBS позволяет увеличить содержание висмута до состава $\text{Y}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (подложка $\text{Sm}_3(\text{Sc,Ga})_5\text{O}_{12}$ $\langle 111 \rangle$) [22]. Пленки $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, нанесенные методами RFMS ($x = 0.8$) [23], PLD ($x = 1.0$ и 2.0) [24] и MOD ($x = 1.0-2.5$) на подложки $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ $\langle 111 \rangle$ или $\langle 100 \rangle$ [25], сохраняют гомогенность после отжига при 500–800°C [23–25]. Использование стеклянных подложек при MOD привело к кристаллизации двухфазных покрытий для составов $\text{YBi}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [26], но полимерные покрытия с наночастицами $\text{Y}_2\text{BiFe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Y}_{1.5}\text{Bi}_{1.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и $\text{Y}_{1.2}\text{Bi}_{1.8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [27], нанесенные на стекла, проявляют качества магнитооптических метапленок. Образование гомогенных наночастиц $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ происходит в результате соосаждения из растворов и термической обработки при 600–725°C ($x = 1.5$ и 1.8) [27, 28]; механохимической обработки простых оксидов и отжига при 775–958°C ($x = 0.4-1.5$) [29]; использования SG-методики и отжига при 850°C ($x = 0.2-1.3$) [30] или SG совместно с SHS и отжига при 900–1000°C ($x = 0.1-0.4$) [31].

Для поликристаллитов $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ соосаждение и отжиг при 700°C позволили достичь $x = 0.75$ [32], а с помощью SSR получены образцы с $x = 0.5$ (1300°C) [33] и $x \sim 1.0$ (950°C) [34]. При использовании MOD примесные фазы для $x = 1.0$ исчезают только при достижении 900°C [35], ниже этой температуры, как и в случае SG ($x = 0.7$ и $1.7, 700^\circ\text{C}$) [36], однофазные висмут-иттриевые феррогранаты не образуются.

При получении гранатов заданного состава представляет интерес снижение температуры синтеза для предотвращения летучести Bi_2O_3 . Одним из способов является замещение Fe на Al и Ga. При 690 и 830°C из расплава $\text{PbO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ (LPE) на подложках $\text{R}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ $\langle 111 \rangle$ ($\text{R} = \text{Y, Tb, Gd}$ и/или Sm) с Ca, Mg и Zr кристаллизуются монокристаллические пленки $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_{5-y}\text{Al}_y\text{O}_{12}$ невоспроизводимого состава с $x \leq 1.34$ и $y \leq 2.22$ [37]. С помощью SG-метода на $(\text{GdCa})_3(\text{GaMgZn})_5\text{O}_{12}$ $\langle 111 \rangle$ нанесены, закристаллизованные (500–560°C) и отожжены (450–660°C) пленки $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_{4.2}\text{Al}_{0.8}\text{O}_{12}$ ($x = 1.5, 2.0$ и 2.5) [38]. В результате RF-распыления образца брутто-состава $\text{YBi}_2\text{Fe}_{3.8}\text{Al}_{1.2}\text{O}_{12}$ на стеклянную подложку (440°C) получена пленка $\text{Y}_{1.08}\text{Bi}_{1.39}\text{Fe}_{4.18}\text{Al}_{1.35}\text{O}_{12}$, закристаллизованная без разложения при 660°C [39]. При пиролизе на стекле (~400°C) и последующем отжиге (680°C)

получены поликристаллические покрытия $Y_{3-x}Bi_xFe_{5-y}Al_yO_{12}$ ($x = 0.5-2.0$, $y = 0-1.2$) [40].

Пленки без редкоземельных элементов $Bi_3Fe_4GaO_{12}$ получены с помощью PLD на кристаллах $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) и $Gd_3(Sc,Ga)_5O_{12}$ (SGGG) (500–580°C) [41]. Методом MOD закристаллизованы пленки $Bi_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ на GGG или замещенном SGGG ($x = 0.2, 0.5, 1.0$; отжиг 400–600°C) [42] и на стеклянных подложках ($x = 0-0.5$, 600–800°C) при использовании буферного слоя $Y_2BiFe_5O_{12}$ [43].

Особое внимание привлекают гранаты $(Y,Bi)_3(Fe,Ga)_5O_{12}$, выращенные из расплава. Для значительного замещения Y на Bi применяется флюс $PbO-Bi_2O_3-B_2O_3$. С увеличением соотношения $PbO : B_2O_3$ повышаются температуры насыщения (890–980°C) и летучесть расплава, при этом в образующихся поликристаллитах бесконтрольно варьируется состав граната $Y_{3-x}Bi_xFe_{5-y}Ga_yO_{12}$, достигая максимальных значений: $x = 1.3$ и $y = 1.67$ [44]. Применение метода LPE также не позволяет задать точный состав граната: для одного и того же свинец- и борсодержащего расплава, в зависимости от температуры и скорости переохлаждения, катионный состав пленок $Y_{3-x}Bi_xFe_{5-y}Ga_yO_{12}$ изменяется в пределах $0.2 < x < 0.8$, $0.95 < y < 1.2$ [45], но в отдельных случаях может быть получен состав $Y_{1.2}Bi_{1.8}(Fe,Ga)_5O_{12}$ [46].

Беспримесные поликристаллические покрытия $Y_{3-x}Bi_xFe_{5-y}Ga_yO_{12}$ заданного состава ($x = 1.0$ и 1.5 , $y = 0.4, 0.8$ и 1.2) образовались в результате пиролиза на стекле (300–400°C) и последующего отжига (640°C) [47]. Однофазные пленки $Y_2BiFe_4GaO_{12}$ получены методом MOD на стекле и Si (100) после отжига в интервале 650–700°C или на GGG (110) с отжигом при 600–850°C [48].

В случае использования образцов $Y_{2.2}Bi_{0.8}FeGa_4O_{12}$ и $Y_{2.2}Bi_{0.8}Fe_{4.8}Ga_{0.2}O_{12}$ при RFMS-напылении на (111) кристаллы $Tb_3Ga_5O_{12}$ и $Gd_3Ga_5O_{12}$ (550°C) состав пленок не воспроизводился и изменялся в значительных пределах – $Y_{2.44-3.08}Bi_{0.21-0.34}Fe_{3.2-4.75}Ga_{0.22-0.64}O_{11.98-13.29}$ [49].

Исследования последнего времени направлены на определение концентрационных границ твердого раствора со структурой граната в рамках квазитверной системы $Y_2O_3-Bi_2O_3-Ga_2O_3-Fe_2O_3$. Для синтеза $(Y,Bi)_3(Fe,Ga)_5O_{12}$ использовался метод сжигания геля, образующегося на основе поливинилового спирта, и полученные нанопорошки отжигали при 760°C для предотвращения летучести оксида висмута. При одновременном введении Bi и Ga в $Y_3Fe_5O_{12}$ максимальное (50%) замещение Y на Bi происходит в области твердых растворов $Y_{1.5}Bi_{1.5}Fe_{2.5}Ga_{2.5}O_{12}-Y_{1.5}Bi_{1.5}Fe_{1.5}Ga_{3.5}O_{12}$ [50]. При отклонении отношения Fe : Ga от интервала

0.43–1.0 растворимость Bi уменьшается и материал становится неоднородным [50].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гранаты $(R,Bi)_3(Fe,M)_5O_{12}$, в которых доля Bi превышает 18.75% от общей суммы катионов металлов, оказываются заведомо метастабильными. В большинстве случаев полученные физические характеристики пленок имеют случайный характер, поскольку их нельзя соотносить с реальным химическим составом материала, который невозможно воспроизвести. Использование однофазных поликристаллов $(Y,Bi)_3(Fe,Ga)_5O_{12}$ в качестве исходных 3D-материалов при физическом распылении или катионных соотношений из области гомогенности для прекурсоров при химическом разложении служит основой получения стабильных пленок и покрытий.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-73-10409).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jawahar K., Chouthary R.N.P. Structural and Dielectric Properties of $LaBi_3Fe_5O_{12}$ // Ind. J. Eng. Mater. Sci. 2008. V. 15. P. 203–206.
2. Hu Q.-C., Chen Y.-Q., Lu P.-W., Huang F., Wang X. Subsolidus Phase Relation in the $Bi_2O_3-Fe_2O_3-La_2O_3$ -system // Chin. Phys. B. 2014. V. 23. № 2. 026402 (5 p.)
3. Chandra Sekhar M., Singh M.R. Fabrication and Characterization of Bismuth-Cerium Composite Iron Garnet Epitaxial Films for Magneto Optical Applications // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. 083525 (13 p.)
4. Lou G., Kato T., Iwata S., Ishibashi T. Magneto-Optical Properties and Magnetic Anisotropy of $Nd_{0.5}Bi_{2.5}Fe_{5-y}Ga_yO_{12}$ Thin Films on Glass Substrates // Opt. Mater. Express. 2017. V. 7. № 7. P. 2248–2259.
5. Liu H., Yuan L., Wang S., Du Y., Zhang Y., Hou C., Feng S. In-situ Optical and Structural Insight of Reversible Thermochromic Materials of $Sm_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ ($x = 0, 0.1, 0.3, 0.5$) // Dyes Pigments. 2017. V. 145. P. 418–426.
6. Singh L.N. Ferromagnetic Resonance and Relaxation Studies in LPE-Grown Bismuth Substituted Europium Iron Garnet Films // J. Magn. Magn. Mater. 2004. V. 273–276. P. 2244–2246.
7. Durčok S., Pollert E., Šimša Z., Hsu J.-T., Tsou Y.-J. Growth of YIG and BiGdIG Single Crystals for Magneto-optical Applications // Mater. Chem. Phys. 1996. V. 45. № 2. P. 124–129.
8. Рандошкин В.В., Козлов В.И., Мочар В.Ю., Васильев Н.В., Воронов В.В. Магнитная анизотропия пленок $(Gd,Bi)_3Fe_5O_{12}$ с ориентацией (100) и (110) // Журн. техн. физики. 1997. Т. 67. № 8. С. 135–137.
9. Park J., Kim C.S. Effects of Bismuth Substitution on $Tb_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. 09M915 (3 p.)

10. Tamaki T., Kaneda H., Kawamura N. Magneto-Optical Properties of $(\text{TbBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and Its Application to a 1.5 μm Wideband Optical Isolator // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. № 8. P. 4581–4583.
11. Guillot M., Le Gall H., Desvignes J.M., Artinian M. Analysis of the Dy Contribution to the Faraday Rotation of Bi-DyIG Film // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. № 8. P. 5432–5434.
12. Zhang G.-Y., Xu X.W., Chong T.-C. Faraday Rotation Spectra of Bismuth-Substituted Rare-Earth Iron Garnet Crystals in Optical Communication Band // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. № 10. P. 5267–5270.
13. Park J., Kim C.S. Structural and Magnetic Characteristics of Bismuth Substituted Holmium Iron Garnet // Phys. Status Solidi. B. 2007. V. 244. № 12. P. 4562–4565.
14. Watanabe T., Aono T., Tamaki T., Tsushima K. Magneto-Optical Properties of $(\text{RBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ at 0.8 nm Wavelength Band // IEEE Trans. J. Magn. Jpn. 1989. V. 4. № 4. P. 221–227.
15. Hansen P., Tölkendorf W. Magnetic and Magneto-Optic Properties of Bismuth-Substituted Thulium Iron-Garnet Films // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. № 8. P. 4577–4579.
16. Syvorotka I.I., Syvorotka I.M., Ubizskii S.B. Growth Peculiarities and Magnetic Properties of $(\text{LuBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ Films by LPE Method // Solid State Phenomena. 2013. V. 200. P. 256–260.
17. Garzarella A., Shinn M.A., Wu Dong Ho. Effects of Magnetically Induced Optical Incoherence in Arrayed Faraday Rotator Crystal // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. 221102 (3 p.)
18. Quadri S.B., Sanghera S., Shinn M., Wu D.H., Bussman K., Amarasinghe P. Structural and Compositional Inhomogeneities in Bismuth-Substituted Rare Earth Iron Garnet Epitaxial Films // Mater. Lett. 2017. V. 207. P. 25–28.
19. Yoshimine I., Satoh T., Iida R., Stupakiewicz A., Maziewski A., Shimura T. Phase-Controllable Spin Wave Generation in Iron Garnet by Linearly Polarized Light Pulses // J. Appl. Phys. 2014. V. 116. 043907 (8 p.)
20. Xu Z.C., Yan M., Li M., Zhang Z.L., Huang M. Faraday Rotation Spectra Analysis of Bi-Substituted Mixed Rare-Earth Iron Garnet Crystals in Optical Communication Band // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. 053910. (4 p.)
21. Li X., Luo Z., Bao J., Gao C., Lu Y. Combinatorial Screening of the BiDyYb Iron Garnet Material System for High Kerr Rotation Composition // IEEE Transaction Magnetics. 2008. V. 44. № 9. P. 2091–2094.
22. Kobayashi H., Okuda T., Kobayashi N., Sakamoto I., Hayashi N. Conversion Electron Mössbauer Study of the $(\text{Bi,Y})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ Single-Crystal Films // J. Magn. Mater. 1992. V. 115. P. 255–259.
23. Kim Y.H., Kim J.S., Kim S.I. Epitaxial Growth and Properties of Bi-Substituted Yttrium-Iron-Garnet Films Grown on (111) Gadolinium-Gallium-Garnet Substrates by Using rf Magnetron Sputtering // J. Korean Phys. Soc. 2003. V. 43. № 3. P. 400–405.
24. Veis M., Lišková E., Antoš R., Višňovský Š., Kumar N., Misra D.S., Venkataramani N., Prasad S., Krishnan R. Polar and Longitudinal Magneto-Optical Spectroscopy of Bismuth Substituted Yttrium Iron Garnet Films Grown by Pulsed Laser Deposition // Thin Solid Films. 2011. V. 519. P. 8041–8046.
25. Jesenska E., Yoshida T., Shinozaki K., Ishibashi T., Beran L., Zahradnik M., Antos R., Kučera M., Veis M. Optical and Magneto-Optical Properties of Bi Substituted Yttrium Iron Garnets Prepared by Metal Organic Decomposition // Opt. Mater. Express. 2016. V. 6. № 6. P. 1987–1997.
26. Galstyan O., Lee H., Lee S., Yoo N., Park J., Babajanyan A., Friedman B., Lee K. Effect of pre-Crystallization on the Preparation of Thick Bi-YIG Films Bythemetall-Organic Decomposition Method // J. Magn. Magn. Mater. 2014. V. 366. P. 24–27.
27. Lee J.W., Oh J.H., Lee J.C., Choi S.C. Magneto-Optical Properties of Bi-YIG Nanoparticles Dispersed in the Organic Binder // J. Magn. Magn. Mater. 2004. V. 272–276. P. 2230–2232.
28. Hong R.Y., Wu Y.J., Feng B., Di G.Q., Li H.Z., Xu B., Zheng Y., Wei D.G. Microwave-Assisted Synthesis and Characterization of Bi-Substituted Yttrium Garnet Nanoparticles // J. Magn. Mater. 2009. V. 321. P. 1106–1110.
29. Jia N., Huaiwu Z., Li J., Liao Y., Jin L., Liu C., Harris V.C. Polycrystalline Bi Substituted YIG Ferrite Processed via Low Temperature Sintering // J. Alloys. Compd. 2017. V. 695. P. 931–936.
30. Xu H., Yang H., Xu W., Yu L. Magnetic Properties of Bi-doped $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ Nanoparticles // Current Appl. Phys. 2008. V. 8. № 1. P. 1–5.
31. Niyafar M., Mohammadpour H. Study on Magnetic Role of Bi^{3+} Ion by Random Cation Distribution Model in Bi-YIG System // J. Magn. Magn. Mater. 2015. V. 395. P. 65–70.
32. Fu Y.-P., Hung D.-S., Cheng C.-W., Tsai F.-Y., Yao Y.-D. Non-Isothermal Crystallization Kinetics and Microwave Properties of $\text{Bi}_{0.75}\text{Y}_{2.25}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ Prepared by Coprecipitation // Ceram. Int. 2009. V. 35. № 2. P. 559–564.
33. Niyafar M., Ramani, Radhakrishna M.C., Mozafari M., Hasapour A., Amighan J. Magnetic Studies of $\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ Fabricated Using Conventional Method // Hyperfine Interact. 2008. V. 187. № 1–3. P. 137–141.
34. Pigošová J., Cigán A., Maňka J. Thermal Synthesis of Bismuth-Doped Yttrium Iron Garnet for Magneto-Optical Imaging // Measurement Sci. Rev. 2008. V. 8. Sec. 3. № 5. P. 126–128.
35. Lee H., Yoon Y., Yoo H., Choi S.A., Kim K., Choi Y., Melikyan H., Ishibashi T., Friedman B., Lee K. Magnetic and FTIR Studies of $\text{Bi}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($x = 0, 1, 2$) Powders Prepared by the Metal Organic Decomposition Method // J. Alloys Compd. 2011. V. 509. P. 9434–9440.
36. Rehspringer J.-L., Bursik J., Niznansky D., Klarikova A. Characterisation of Bismuth-Doped Yttrium Iron Garnet Layers Prepared by Sol-Gel Process // J. Magn. Mater. 2000. V. 211. P. 291–295.
37. Hansen P., Witter K., Tölkendorf W. Magnetic and Magneto-Optic Properties of Bismuth- and Aluminum-Substituted Iron Garnet Film // J. Appl. Phys. 1984. V. 55. № 4. P. 1052–1061.
38. Matsumoto K., Sasaki S., Haraga K., Yamaguchi K., Fujii T. Enhancement of Magneto-Optical Faraday Rotation by Bismuth Substitution in Bismuth and Aluminum Substituted Yttrium-Iron-Garnet Single-Crystal Films Grown by Coating Gels // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. № 5. P. 2467–2469.
39. Gomi M., Tanida T., Abe M. RF Sputtering of Highly Bi-Substituted Garnet Films on Glass Substrates for Magneto-Optic Memory // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. № 1. P. 3888–3890.

40. *Cho J., Gomi M., Abe M.* Bi-Substituted Iron Garnet Films with Fine Grains Prepared by Pyrolysis // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 70. № 10. P. 6301–6303.
41. *Kang S., Yin S., Adyam Y., Li Q., Zhu Y.* $\text{Bi}_3\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$ Garnet Properties and Its Application to Ultrafast Switching in the Visible Spectrum // *IEEE Trans. Magn.* 2007. V. 43. № 9. P. 3656–3660.
42. *Adachi N., Yogo K., Ota T., Takahashi M., Ishiyama K.* Magneto-Optical Effect and Ferromagnetic Resonance of Bi–Fe Garnet for High Frequency Electromagnetic Sensor // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 109. 07A506 (3 p.)
43. *Katagari N., Adachi N., Yogo K., Watanabe K., Awata S., Ota T.* Synthesis and Magnet-Optical Properties of $\text{Bi}_3(\text{FeGa})_3\text{O}_{12}$ on Glass Substrate Prepared by MOD Technuque // *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.* 2013. V. 38. № 2. P. 269–272.
44. Сапожников Ю.Л., Березин И.Л., Саксонов Ю.Г., Федорова Г.Я. Физико-химические исследования составов системы $\text{Y}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ – PbO – B_2O_3 – Bi_2O_3 // Неорган. материалы. 1977. Т. 13. № 4. С. 684–687.
45. *Okamura Y., Nakamura T., Yamamoto S.* Influence of Growth Temperature on the Optical Properties of the $(\text{YBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ Film Waveguides // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1983. V. 22. № 9. P. 1400–1403.
46. *Aichele T., Lorenz A., Hergt R., Gömert P.* Garnet Layers Prepared by Liquid Phase Epitaxy for Microwave and Magneto-Optical Applications – a Review // *Cryst. Res. Technol.* 2003. V. 38. № 7–8. P. 575–587.
47. *Gomi M., Asogawa M., Abe M.* Magnetic and Magneto-Optic Properties of Bi, Ga (Or Al) Substituted Garnet Films Prepared by Pyrolysis Method // *J. Magn. Soc. Jpn.* 1986. V. 10. № 2. P. 217–220.
48. *Ishibashi T., Mizusawa A., Nagai M., Mogi T., Shimizu S., Sato K., Togashi N., Mogi T., Houchido M., Sano H., Houchido M.* Characterization of Epitaxial $(\text{Y,Bi})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ Thin Films Grown by Metal-Organic Decomposition Method // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97. 013516 (4 p.)
49. *Kumar P., Maydykovsky A.I., Levy M., Dubrovina N.V., Aktsipetrov O.A.* Second Harmonic Generation Study of Internally Generated Strain in Bismuth-Substituted Iron Garnet Films // *Opt. Express.* 2010. V. 18. № 2. P. 1076–1084.
50. Смирнова М.Е., Нипан Г.Д., Никифорова Г.Е. Область твердого раствора $(\text{Y}_{1-x}\text{Bi}_x)_3(\text{Fe}_{1-y}\text{Ga}_y)_5\text{O}_{12}$ на диаграмме Йенеке // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 7. С. 721–726.