

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-912-920

УДК 666.3

## Исследование влияния отклонения от стехиометрии иттрий-алюминиевого граната на эффективность конверсии ионов хрома в четырехвалентное состояние

Федор Федорович Малявин<sup>1</sup>, Александр Александрович Кравцов<sup>2</sup>,  
Виталий Алексеевич Тарала<sup>3</sup>, Ирина Сергеевна Чикулина<sup>4</sup>,  
Дмитрий Сергеевич Вакалов<sup>5</sup>, Вячеслав Анатольевич Лапин<sup>6</sup>,  
Марина Сергеевна Никова<sup>7</sup>, Светлана Эдуардовна Хорошилова<sup>8</sup>,  
Евгений Викторович Медяник<sup>9</sup>, Дмитрий Сергеевич Кулешов<sup>10</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6,7,8,9,10</sup> Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355009, Российская Федерация  
<sup>2,6</sup> Федеральный исследовательский центр Южного научного центра Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344060, Российская Федерация

<sup>1</sup> fedormalyavin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5255-9346>

<sup>2</sup> sanya-kravtsov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0645-1166>

<sup>3</sup> vityaly-tarala@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6688-2681>

<sup>4</sup> iraaaa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0871-8776>

<sup>5</sup> megadims@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6788-3811>

<sup>6</sup> viacheslavlapin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1938-4134>

<sup>7</sup> m-s-shama@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8810-4493>

<sup>8</sup> skhoroshilova@ncfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4287-8183>

<sup>9</sup> medianik84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5947-7810>

<sup>10</sup> kule-dmitry@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4314-1578>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследованы эффективность конверсии ионов Cr<sup>4+</sup> и оптические свойства керамики на основе иттрий-алюминиевого граната, легированного хромом. Повышение эффективности конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup> открывает широкие перспективы использования керамики в качестве насыщающихся поглотителей для пассивной модуляции добротности Nd- и Yb-твердотельных лазеров. Цель работы — исследование влияния концентрации оксида магния на эффективность конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup> в условиях избытка катионов Al<sup>3+</sup> (4,8 мол.%) и Y<sup>3+</sup> (2,9 мол.%) в структуре граната, а также при стехиометричном соотношении Y<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup> = 3/5. Исследована возможность изменения концентрации ионов Cr<sup>4+</sup> как в октаэдрической, так и тетраэдрической позиции за счет образующихся дефектов замещения магния при отклонении состава композиции от стехиометрии иттрий-алюминиевого граната. **Метод.** Оптическая керамика на основе иттрий-алюминиевого граната с различным соотношением катионов Y<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup>, допированная хромом, получена методом двухстадийного соосаждения. В качестве спекающей добавки и компенсатора заряда для преобразования ионов хрома из трехвалентного в четырехвалентное состояние использован оксид магния в концентрациях от 0 до 0,2 масс.%. **Основные результаты.** Установлено, что наличие избытка алюминия в матрице иттрий-алюминиевого граната приводит к снижению эффективности конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup>. Отклонение от стехиометрии в сторону избытка иттрия способствует снижению температуры отжига на воздухе, при которой происходит окисление ионов хрома в четырехвалентное состояние и их переход в тетраэдрическую позицию. Однако оптическое пропускание образцов с избытком иттрия ниже, чем в случае избытка алюминия и стехиометрии. Показано, что при увеличении температуры вакуумного спекания от 1780 до 1820 °C в образцах с избытком алюминия происходит повышение концентрации ионов Cr<sup>4+</sup> в тетраэдрической позиции, о чем свидетельствует более высокая интенсивность поглощения на длине волны 1030 нм. Для случаев стехиометрии и избытка иттрия в гранате данный эффект выражен слабее. **Практическая значимость.** Получены образцы оптической керамики иттрий-алюминиевого граната со светопропусканием более 75 % в видимом и ближнем

© Малявин Ф.Ф., Кравцов А.А., Тарала В.А., Чикулина И.С., Вакалов Д.С., Лапин В.А., Никова М.С., Хорошилова С.Э., Медяник Е.В., Кулешов Д.С., 2022

инфракрасном диапазоне с выраженными полосами поглощения хрома. Результаты работы могут быть применены при создании пассивных затворов для твердотельных лазеров.

#### Ключевые слова

оптически прозрачная керамика, иттрий-алюминиевый гранат, насыщающиеся поглотители для пассивной модуляции добротности, спектры оптического пропускания, стехиометрия, хром

#### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект МК-3786.2021.1.3). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Северо-Кавказского федерального университета при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RF----2296.61321X0029 (соглашение № 075-15-2021-687).

**Ссылка для цитирования:** Малявин Ф.Ф., Кравцов А.А., Тарала В.А., Чикулина И.С., Вакалов Д.С., Лапин В.А., Никова М.С., Хорошилова С.Э., Медяник Е.В., Кулешов Д.С. Исследование влияния отклонения от стехиометрии иттрий-алюминиевого граната на эффективность конверсии ионов хрома в четырехвалентное состояние // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 912–920. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-912-920

## The impact of yttrium aluminum garnet stoichiometry deviation on the conversion efficiency of tetravalent chromium ions

Fedor F. Malyavin<sup>1</sup>✉, Alexander A. Kravtsov<sup>2</sup>, Vitaly A. Tarala<sup>3</sup>, Irina S. Chikulina<sup>4</sup>,  
Dmitry S. Vakalov<sup>5</sup>, Viacheslav A. Lapin<sup>6</sup>, Marina S. Nikova<sup>7</sup>, Svetlana E. Khoroshilova<sup>8</sup>,  
Evgenii V. Medyanik<sup>9</sup>, Dmitry S. Kuleshov<sup>10</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6,7,8,9,10</sup> North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355009, Russian Federation

<sup>2,6</sup> Federal Research Center of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344060, Russian Federation

<sup>1</sup> fedormalyavin@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-5255-9346>

<sup>2</sup> sanya-kravtsov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0645-1166>

<sup>3</sup> vitaly-tarala@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6688-2681>

<sup>4</sup> iraaaa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0871-8776>

<sup>5</sup> megadims@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6788-3811>

<sup>6</sup> viacheslavlapin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1938-4134>

<sup>7</sup> m-s-shama@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8810-4493>

<sup>8</sup> skhoroshilova@ncfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4287-8183>

<sup>9</sup> miedianik84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5947-7810>

<sup>10</sup> kule-dmitry@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4314-1578>

#### Abstract

In this work, the conversion efficiency of Cr<sup>4+</sup> ions and the optical properties of ceramics based on chromium-doped yttrium aluminum garnet were investigated. Increasing the conversion efficiency of Cr<sup>3+</sup> to Cr<sup>4+</sup> opens up broad prospects for using YAG ceramics as saturable absorbers for passive Q-switching of Nd- and Yb-solid-state lasers. The aim of this work was to study the effect of magnesium oxide concentration on the conversion efficiency of Cr<sup>3+</sup> to Cr<sup>4+</sup> under conditions of Al<sup>3+</sup> (4.8 mol.%) and Y<sup>3+</sup> (2.9 mol.%) cations excess in the garnet structure as well as the stoichiometric ratio Y<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup> = 3/5. The possibility of changing the concentration of Cr<sup>4+</sup> ions in both the octahedral and tetrahedral positions due to the formation of magnesium substitution defects when the composition deviates from the yttrium-aluminum garnet stoichiometry has been studied. Chromium-doped transparent optical ceramics based on yttrium-aluminum garnet with different ratios of Y<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup> cations was obtained by the two-stage coprecipitation method. Magnesium oxide was used as a sintering additive and charge compensator for converting chromium ions from the trivalent to the tetravalent state in concentrations of 0 to 0.2 wt.%. It was found that aluminum excess in the yttrium-aluminum garnet matrix leads to a decrease in the Cr<sup>3+</sup> to Cr<sup>4+</sup> conversion efficiency. A deviation of stoichiometry towards an excess of yttrium leads to a decrease of air annealing temperature for oxidizing chromium ions to the tetravalent state and their transition to the tetrahedral position. However, the samples optical transmittance with an excess of yttrium was lower than in the cases of an excess of aluminum and stoichiometry. It was found that with an increase in the vacuum sintering temperature from 1780 to 1820 °C in the samples with an excess of aluminum, an increase in the concentration of Cr<sup>4+</sup> ions in the tetrahedral position occurs, as evidenced by higher absorption intensity at a wavelength of 1030 nm. For the cases of stoichiometry and an excess of yttrium in garnet, this effect is less pronounced. Samples of optical ceramics of yttrium-aluminum garnet with a light transmission of more than 75 % in the visible and near-IR ranges with pronounced absorption bands of chromium have been obtained. The results of the work can be applied to the creation of passive switches for solid-state lasers.

#### Keywords

optical transparent ceramics, yttrium aluminum garnet, saturable absorbers for passive Q-switching, optical transmission spectra, stoichiometry, chromium

#### Acknowledgments

This work was financially supported by the Council for Grants of the President of the Russian Federation (project No. МК-3786.2021.1.3). The work was carried out using the equipment of the Center for Collective Use of the North

Caucasus Federal University with financial support from the Ministry of Education and Science of Russia, unique project identifier RF ---- 2296.61321X0029 (agreement No. 075-15-2021-687).

**For citation:** Malyavin F.F., Kravtsov A.A., Tarala V.A., Chikulina I.S., Vakalov D.S., Lapin V.A., Nikova M.S., Khoroshilova S.E., Medyanik E.V., Kuleshov D.S. The impact of yttrium aluminum garnet stoichiometry deviation on the conversion efficiency of tetravalent chromium ions. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 912–920 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-912-920

## Введение

Иттрий-алюминиевый гранат, легированный хромом (YAG:Cr<sup>4+</sup>), обладает уникальным набором характеристик, что делает его незаменимым материалом поглотителей для пассивной модуляции добротности в Nd- или Yb-легированных кристаллах в диапазоне длин волн 0,85–1,2 мкм [1–6]. Кристаллы YAG:Cr<sup>4+</sup> получают методом Чохральского или с помощью керамической технологии [7]. Керамическая технология обладает рядом преимуществ перед технологией роста монокристаллов, таких как более высокая скорость и простота производства, снижение затрат на резку и обработку выращенных кристаллов; возможность получения изделий необходимой формы и размеров, а также композитных структур непосредственно в процессе компактирования, и т. д. [8].

Известно, что для изготовления насыщаемых поглотителей на основе керамики YAG:Cr необходимо обеспечить высокую эффективность конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup> в материале [9–11] и переход максимального количества ионов Cr<sup>4+</sup> в тетраэдрическую позицию [12]. Данная задача является нетривиальной, так как изначально в процессе синтеза керамического порошка хром входит в кристаллическую решетку граната только в виде трехвалентного иона Cr<sup>3+</sup> в октаэдрическую позицию алюминия [5, 13, 14]. Для перехода Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup> необходимо наличие примесей двухвалентных катионов Ca<sup>2+</sup> или Mg<sup>2+</sup> в кристаллической решетке YAG и проведение после вакуумного спекания длительного окислительного обжига при температурах свыше 1000 °C [9, 13].

Отметим, что только небольшая доля ионов хрома переходит в четырехвалентное состояние. В работе [13], при исследовании спектров люминесценции неотожженного и отожженного на воздухе монокристалла YAG:Cr, разница интенсивностей поглощения хрома составила не более 5 %. Показано, что общая концентрация ионов Cr<sup>4+</sup> — постоянная величина, так как снижение интенсивности пиков Cr<sup>4+</sup> после отжига на воздухе при 1000 °C в октаэдрической позиции сопровождается появлением пиков в тетраэдрической [13].

В настоящее время проведено большое количество исследований с целью увеличения эффективности конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup> в YAG:Cr керамике. Исследования включали оценку влияния: спекающих добавок [15–17], условий и среды отжига [9, 10], соотношений CaO/MgO [20] и (CaO + MgO)/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [15], а также концентрации ионов хрома [9] и кальция [18, 19], и т. д.

Принято, что оксид кальция (CaO) — более эффективная добавка для увеличения эффективности конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup> [21], а добавка оксида магния (MgO), предположительно, необходима для улучшения

прозрачности YAG:Cr<sup>4+</sup> керамики, допированной кальцием. В то же время в работах [18, 22] рассмотрено изготовление прозрачной YAG:Cr<sup>4+</sup> керамики с использованием только добавки CaO. Заметим, что работ, в которых показано влияние магния на эффективность конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup>, очень мало.

Например, в [21, 23] предположено, что ионы Mg<sup>2+</sup> в YAG:Cr могут занимать интерстиции, конкурируя за пространство с октаэдрически координированными ионами Cr<sup>3+</sup>. В результате эффективность конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup> ниже, чем в случае совместного легирования с кальцием. Также ионы Mg<sup>2+</sup> могут встраиваться в октаэдрические позиции, что приводит к искажению решетки YAG [21].

В работе [23] показано, что при использовании добавки MgO очень критична температура вакуумного спекания. В частности, концентрация ионов Cr<sup>4+</sup>, особенно в тетраэдрической позиции, снижается при увеличении температуры от 1750 до 1800 °C. Авторы предположили, что увеличение температуры вакуумного спекания способствует перемещению большего числа ионов Mg<sup>2+</sup> в интерстиции, в результате чего последние не участвуют в формировании Cr<sup>4+</sup>.

В предыдущей работе авторов [24] показано, что ионы магния могут занимать как октаэдрические, так и додекаэдрические позиции в решетке граната в зависимости от смещения стехиометрии в сторону избытка иттрия или алюминия соответственно. Это, в свою очередь, оказало существенное влияние на оптические свойства и микроструктуру керамики [25].

В настоящей работе проведены исследования изученных ранее составов оптических керамик [24, 25], дополнительно солегированных ионами хрома. Исследование представляет большой научный и практический интерес, так как вероятно, что смещение стехиометрии в сочетании с изменением положения внедренных ионов магния может оказывать влияние на эффективность конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup> в матрице иттрий-алюминиевого граната.

Цель работы — исследование влияния концентрации оксида магния на эффективность конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup> в условиях избытка катионов Al<sup>3+</sup> (4,8 мол.%) и Y<sup>3+</sup> (2,9 мол.%) в структуре граната, а также при стехиометричном соотношении Y<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup> = 3/5.

## Материалы и методы

При синтезе керамики использованы следующие реагенты: аммиак водный (25 %, ОСЧ, Sigma tech, Россия); алюминия нитрат нонагидрат (99,99 % (следы металлов), Acros organics, Бельгия); иттрия нитрат гексагидрат (99,9 %, (следы металлов), Chemical point, Германия); нитрат хрома (III) нонагидрат (99,99 %, Acros organics, Бельгия); аммоний серноокислый (99 %, Acros organics, Бельгия).

Ч, Интерхим, Россия); изопропиловый спирт (99,95 %, ХЧ, Экос-1, Россия); гексаметилентетрамин (99,7 %, Марка С, сорт высший, Интерхим, Россия); магний хлористый, гексагидрат (99,9 %, ЧДА, Интерхим, Россия). Все химические вещества применены без стадии дополнительной очистки. Для всех реакций и процессов обработки использована деионизованная вода.

Образцы керамических порошков, соответствующие различной стехиометрии ( $Al\_Cr$  (4,8 мол.% избытка Al),  $S\_Cr$  (стехиометричный YAG),  $Y\_Cr$  (2,9 мол.% избытка Y)) получены методом двухстадийного соосаждения уротропином с последующим измельчением и прокаливанием порошка прекурсора. Методика получения керамического порошка подробно описана в работе [26]. На стадии измельчения прекурсора в каждый из полученных составов введена спекающая добавка MgO в концентрациях 0, 0,05, 0,1, 0,2 масс.% в пересчете на керамический порошок. Концентрация хрома фиксирована во всех образцах и составила 0,01 ат.%.

Компактирование керамических порошков проведено методом одноосного прессования в стальной пресс-форме диаметром 13 мм без использования связующих добавок. Давление прессования имело постоянное значение 50 МПа.

Выбор величины давления одноосного прессования проведен с учетом результатов, представленных в работе [27]. Выполнен отжиг полученных компактов на воздухе при температуре 1300 °C в течение 2 ч в печи Nabertherm NT 40/17 (Германия).

Спекание компактов осуществлено в вакуумной печи СШВЭ-1.2,5/25 с вольфрамовыми нагревателями при температурах 1780 и 1820 °C в течение 20 ч. Полученные образцы керамики последовательно отожжены на воздухе при температурах 1100, 1300 и 1500 °C в течение 10 ч. Далее образцы прошли двустороннюю шлифовку и полировку, и измерение спектров свето-

пропускания. Финальная толщина образцов составила  $2,5 \pm 0,1$  мм.

Оптические свойства полученных образцов керамики проанализированы методом спектрофотометрии с помощью спектрофотометра SF-56 (ОКБ «ЛОМО», Санкт-Петербург, Россия).

### Результаты и их обсуждение

Известно, что хром входит в кристаллическую решетку граната только в виде трехвалентного иона  $Cr^{3+}$  [13]. Из-за близости ионных радиусов  $Al^{3+}$  (0,0535 нм — октаэдрическая позиция) и  $Cr^{3+}$  (0,0615 нм), последний встраивается вначале только в октаэдрическую позицию алюминия в решетке иттрий-алюминиевого граната [12]. Полосы поглощения  $Cr^{3+}$  (octa) соответствуют длинам волн 430 нм и 590 нм [9–11]. В результате сразу после вакуумного спекания образцы имеют зеленоватую окраску. При последующем обжиге керамики YAG:Cr, содержащей в своем составе двухвалентные катионы  $Ca^{2+}$  или  $Mg^{2+}$ , на воздухе часть ионов  $Cr^{3+}$  окисляется до  $Cr^{4+}$  за счет диффузии молекулярного кислорода и компенсации кислородных вакансий [28]. Часть уже окисленных ионов  $Cr^{4+}$ , находящихся в октаэдрической позиции —  $Cr^{4+}$  (octa) переходит в тетраэдрические позиции алюминия за счет внутрирешеточного катионного обмена [9, 13, 28, 29]. В итоге образуются центры поглощения —  $Cr^{4+}$  (tetra). Наиболее выраженный пик  $Cr^{4+}$  (octa) приходится на длину волны порядка 480 нм,  $Cr^{4+}$  (tetra) — широкая полоса поглощения в диапазоне 800–1200 нм с центром при 1030 нм [9]. Цвет хром-содержащих образцов YAG после обжига на воздухе приобретает коричневатую окраску.

В таблице представлены фотографии образцов керамики YAG:Cr до и после отжига при различных тем-

Таблица. Фотографии керамических образцов  $Al\_Cr$ ,  $S\_Cr$  и  $Y\_Cr$  с различной концентрацией оксида магния и отклонением от стехиометрии. Размер изображения 14 мм × 14 мм

Table. Photographs of ceramic samples  $Al\_Cr$ ,  $S\_Cr$  and  $Y\_Cr$  with different concentrations of magnesium oxide and deviation from stoichiometry. The size of images is 14 mm × 14 mm

Образец	$Al\_Cr$			$S\_Cr$			$Y\_Cr$		
	Температура отжига на воздухе T, °C								
Концентрация оксида магния, масс.%	1100	1300	1500	1100	1300	1500	1100	1300	1500
0,00									
0,05									
0,10									
0,20									

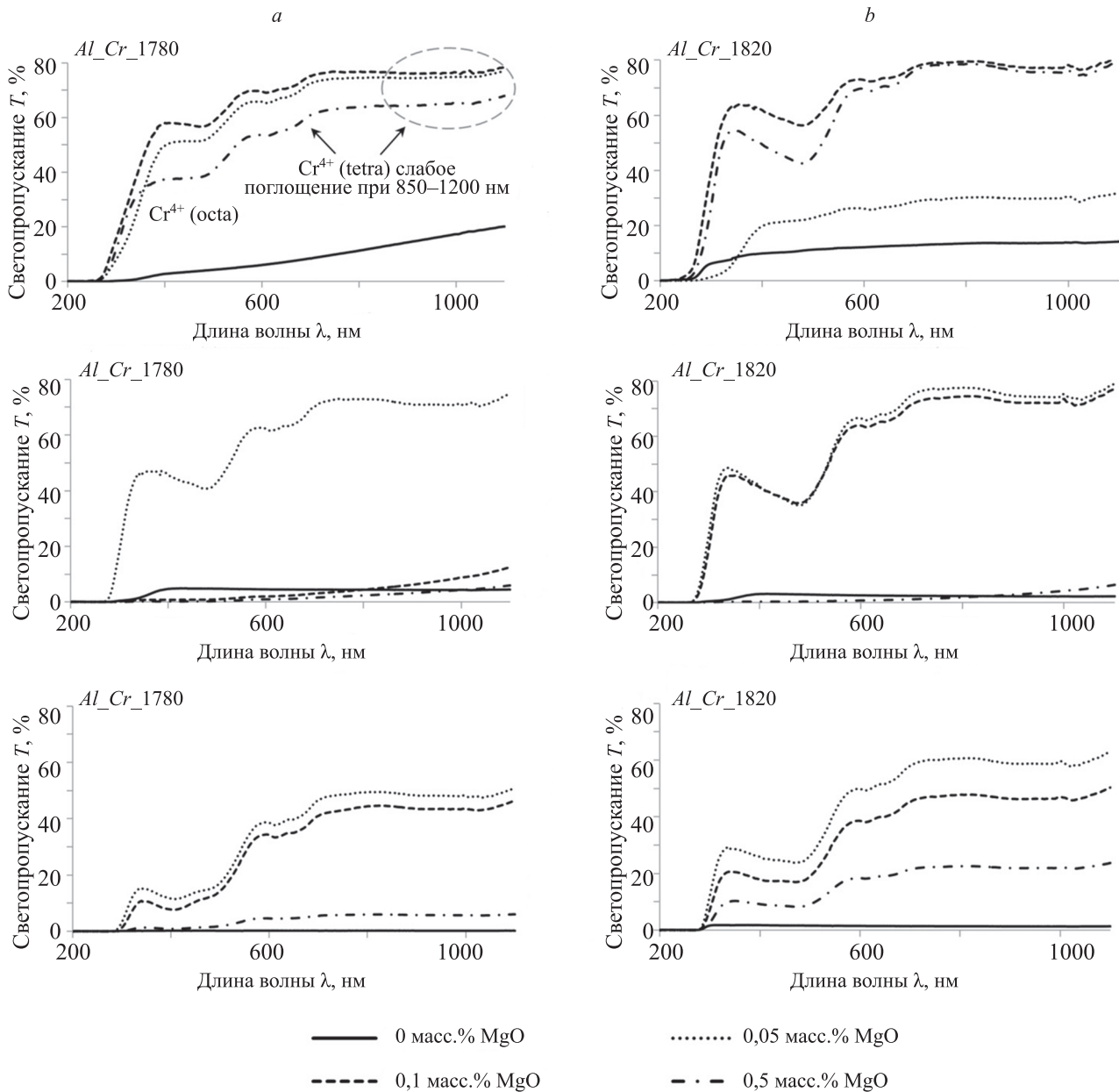


Рисунок. Спектры оптического пропускания YAG керамики после вакуумного спекания при 1780 °C (a) и 1820 °C (b) и отжига на воздухе при 1500 °C

Figure. Optical transmittance spectra of YAG ceramics after vacuum sintering at 1780 °C (a) and 1820 °C (b) and air annealing at 1500 °C

пературах на воздухе. При увеличении температуры отжига на воздухе образцы YAG:Cr, имеющие в своем составе оксид магния, приобрели характерную для YAG:Cr<sup>4+</sup> коричневую окраску. С увеличением температуры отжига и концентрации оксида магния цвет образцов стал более насыщенным. Образцы керамики, не имеющие в своем составе оксида магния, не изменили цвет после отжига. Данный факт свидетельствует об отсутствии конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup> при условии отсутствия компенсатора заряда, в роли которого использован ион Mg<sup>2+</sup>.

Предположим, что отклонение от стехиометрии оказывает влияние на температуру, при которой начинается процесс конверсии ионов Cr<sup>3+</sup> в Cr<sup>4+</sup> и их переход из

октаэдрического в тетраэдрическое положение. Так, у образца *Al\_Cr*, имеющего в составе избыток алюминия и MgO окрашивание наблюдается только после отжига при температуре 1300 °C. Цвет образца *Al\_Cr* менее насыщен, чем образцов *S\_Cr* и *Y\_Cr*.

Образец *S\_Cr*, соответствующий стехиометричному составу приобрел окрашивание после отжига при температуре 1300 °C. Изменение цвета образцов *Y\_Cr*, содержащих избыток иттрия, при концентрациях MgO 0,05 и 0,1 масс.% наблюдается при температуре отжига 1100 °C. Следовательно, в случае избытка иттрия для начала окисления ионов хрома в четырехвалентное состояние и их перехода в тетраэдрическое положение в решетке иттрий-алюминиевого граната требуется

меньшая температура отжига на воздухе, чем в случае избытка алюминия и стехиометрии.

Данный факт можно объяснить следующим образом. В работе [24] показано, что расчетная концентрация ионов магния на месте алюминия в позиции 16a (в октаэдрической подрешетке YAG) выше в случае избытка иттрия. Исходя из этого, можно предположить, что при избытке иттрия создаются благоприятные условия для встраивания ионов  $Mg^{2+}$  в октаэдрическую позицию. В результате генерируется значительное количество кислородных вакансий и связанных с ними комплексных точечных дефектов, участвующих в окислении хрома при обжиге на воздухе. Кроме того, в октаэдрической позиции существует достаточное число позиций для внедрения ионов  $Cr^{3+}$  и исключения их конкуренции с ионами  $Mg^{2+}$ .

При избытке алюминия возникает обратная ситуация — затрудняется внедрение ионов  $Cr^{3+}$  и  $Mg^{2+}$  в октаэдрическую подрешетку. За счет компенсации стехиометрии часть ионов магния занимает позиции иттрия [24, 25]. Сравнительно слабое поглощение при 800–1200 нм у образца  $Al\_Cr$  по сравнению с образцами  $S\_Cr$  и  $Y\_Cr$  указывает на очень малое количество ионов  $Cr^{4+}$  (tetra) (рисунок, а).

Отметим, что светопропускание керамики с избытком иттрия  $Y\_Cr$  составило не более 60 %, что значительно ниже, чем в случаях стехиометрического состава образцов  $S\_Cr$  и избытка алюминия  $Al\_Cr$ .

Сравнивая спектры светопропускания, представленные на рисунке, а, b, очевидно, что не только стехиометрия, но и температура вакуумного спекания оказывает влияние на концентрацию ионов  $Cr^{4+}$ . Образец  $Al\_Cr$ , полученный при температуре 1820 °С, имеет более темную и насыщенную окраску по сравнению с полученным при температуре 1780 °С. На спектрах оптического пропускания образца  $Al\_Cr$ , полученного при температуре 1820 °С, наблюдается более высокая интенсивность полос поглощения  $Cr^{4+}$  (octa) и  $Cr^{4+}$  (tetra). Данный факт дает основание полагать, что спекание при более высокой температуре привело к увеличению концентрации ионов  $Cr^{4+}$  и их доли в тетраэдрической позиции.

### Литература

1. Dong J., Ueda K., Shirakawa A., Yagi H., Yanagitani T., Kaminskii A. Composite Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG ceramics picosecond microchip lasers // *Optics Express*. 2007. V. 15. N 22. P. 14516–14523. <https://doi.org/10.1364/OE.15.014516>
2. Kalisky Y. Cr<sup>4+</sup>-doped crystals: Their use as lasers and passive Q-switches // *Progress in Quantum Electronics*. 2004. V. 28. N 5. P. 249–303. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2004.09.001>
3. Kalisky Y., Kravchik L., Kokta M. Performance of diode-end-pumped Cr<sup>4+</sup>, Nd<sup>3+</sup>:YAG self-Q-switched and Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG diffusion bonded lasers // *Optical Materials*. 2004. V. 24. N 4. P. 607–614. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(03\)00163-0](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(03)00163-0)
4. Dong J., Deng P. Laser performance of monolithic Cr,Nd:YAG self-Q-switched laser // *Optics Communications*. 2003. V. 220. N 4–6. P. 425–431. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(03\)01450-0](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01450-0)
5. Dong J., Ueda K., Yagi H., Kaminskii A. Laser-diode pumped self-Q-switched microchip lasers // *Optical Review*. 2008. V. 15. N 2. P. 57–74. <https://doi.org/10.1007/S10043-008-0010-3>

### Заключение

Исследовано влияние отклонения от стехиометрии на эффективность конверсии ионов  $Cr^{3+}$  в  $Cr^{4+}$  при использовании в качестве компенсатора заряда добавки оксида магния. Показано, что избыток алюминия снижает эффективность конверсии ионов  $Cr^{3+}$  в  $Cr^{4+}$ . В образцах с избытком алюминия (4,8 мол.%), полученных при температуре 1780 °С, поглощение при длине волны около 1030 нм практически отсутствует, что свидетельствует о сравнительно малой концентрации центров  $Cr^{4+}$  (tetra) по сравнению со стехиометрическими образцами и образцами с избытком иттрия. При этом образцы с избытком алюминия в гранате обладают высокой прозрачностью.

Смещение стехиометрии в сторону избытка иттрия при получении керамики YAG:Cr<sup>4+</sup> в присутствии магния в качестве одиночной допирующей примеси привела к снижению температуры отжига на воздухе, при которой начинается процесс конверсии ионов  $Cr^{3+}$  в  $Cr^{4+}$  и их переход в тетраэдрическую позицию по сравнению со случаем избытка алюминия и стехиометрии. Возможно, при таком составе композиции в октаэдрической подрешетке YAG имеется достаточное количество позиций для внедрения ионов магния и хрома. Однако для составов YAG:Cr с избытком иттрия светопропускание образцов было ниже, чем для стехиометрических составов и для составов с избытком алюминия.

Стехиометрические составы с содержанием магния не более 0,05 масс.% для температуры 1780 °С и не более 0,1 масс.% для температуры 1820 °С обеспечивают получение высокопрозрачной керамики с выраженными полосами поглощения  $Cr^{4+}$  как в октаэдрической, так и в тетраэдрической позициях.

Установлено, что при увеличении температуры вакуумного спекания с 1780 до 1820 °С в образцах с избытком алюминия происходит увеличение концентрации ионов  $Cr^{4+}$  (tetra). Об этом свидетельствует более насыщенный цвет образцов и более высокая интенсивность поглощения при длине волны около 1030 нм. В образцах стехиометрического состава и с избытком иттрия данный эффект выражен слабее.

### References

1. Dong J., Ueda K., Shirakawa A., Yagi H., Yanagitani T., Kaminskii A. Composite Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG ceramics picosecond microchip lasers. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 22, pp. 14516–14523. <https://doi.org/10.1364/OE.15.014516>
2. Kalisky Y. Cr<sup>4+</sup>-doped crystals: Their use as lasers and passive Q-switches. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, vol. 28, no. 5, pp. 249–303. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2004.09.001>
3. Kalisky Y., Kravchik L., Kokta M. Performance of diode-end-pumped Cr<sup>4+</sup>, Nd<sup>3+</sup>:YAG self-Q-switched and Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG diffusion bonded lasers. *Optical Materials*, 2004, vol. 24, no. 4, pp. 607–614. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(03\)00163-0](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(03)00163-0)
4. Dong J., Deng P. Laser performance of monolithic Cr,Nd:YAG self-Q-switched laser. *Optics Communications*, 2003, vol. 220, no. 4–6, pp. 425–431. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(03\)01450-0](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(03)01450-0)
5. Dong J., Ueda K., Yagi H., Kaminskii A. Laser-diode pumped self-Q-switched microchip lasers. *Optical Review*, 2008, vol. 15, no. 2, pp. 57–74. <https://doi.org/10.1007/S10043-008-0010-3>

6. Ikesue A., Yoshida K., Kamata K. Transparent Cr<sup>4+</sup>-doped YAG ceramics for tunable lasers // *Journal of the American Ceramic Society*. 1996. V. 79. N 2. P. 507–509. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08154.x>
7. Li J., Wu Y., Pan Y., Guo J. Fabrication of Cr<sup>4+</sup>,Nd<sup>3+</sup>:YAG transparent ceramics for self-Q-switched laser // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2006. V. 352. N 23–25. P. 2404–2407. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.02.062>
8. Kong L.B., Huang Y., Que W., Zhang T., Li S., Zhang J., Dong Z., Tang D. *Transparent Ceramics*. Springer Cham, 2015. 734 p. (Topics in Mining, Metallurgy and Materials). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18956-7>
9. Zhou T., Zhang L., Li Z., Wei S., Wu J., Wang L., Yang H., Fu Z., Chen H., Wong C., Zhang Q. Enhanced conversion efficiency of Cr<sup>4+</sup> ion in Cr: YAG transparent ceramic by optimizing the annealing process and doping concentration // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. V. 703. P. 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.338>
10. Yagi H., Takaichi K., Ueda K., Yanagitani T., Kaminskii A. Influence of annealing conditions on the optical properties of chromium-doped ceramic Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> // *Optical Materials*. 2006. V. 29. N 4. P. 392–396. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2005.08.035>
11. Chaika M., Paszkowicz W., Strek W., Hreniak D., Tomala R., Safronova N., Doroshenko A., Parkhomenko S., Dluzewski P., Kozłowski M., Vovk O. Influence of Cr doping on the phase composition of Cr,Ca:YAG ceramics by solid state reaction sintering // *Journal of the American Ceramic Society*. 2019. V. 102. N 4. P. 2104–2115. <https://doi.org/10.1111/jace.16024>
12. Chaika M., Tomala R., Strek W., Hreniak D., Dluzewski P., Morawiec K., Mateychenko P., Fedorov A., Doroshenko A., Parkhomenko S., Lesniewska-Matys K., Podniesinski D., Kozłowska A., Mancardi G., Vovk O. Kinetics of Cr<sup>3+</sup> to Cr<sup>4+</sup> ion valence transformations and intra-lattice cation exchange of Cr<sup>4+</sup> in Cr,Ca:YAG ceramics used as laser gain and passive Q-switching media // *Journal of Chemical Physics*. 2019. V. 151. N 13. P. 134708. <https://doi.org/10.1063/1.5118321>
13. Feldman R., Shimony Y., Burshtein Z. Dynamics of chromium ion valence transformations in Cr,Ca:YAG crystals used as laser gain and passive Q-switching media // *Optical Materials*. 2003. V. 24. N 1–2. P. 333–344. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(03\)00146-0](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(03)00146-0)
14. Boulesteix R., Perrière C., Maître A., Chrétien L., Brenier A., Guyotd Y. Fabrication of YAG/Cr:YAG transparent composite ceramics and characterization by light sheet fluorescence imaging // *Optical Materials*. 2019. V. 96. P. 109324. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109324>
15. Zhou T., Zhang L., Yang H., Qiao X., Liu P., Tang D., Zhang J. Effects of sintering AIDS on the transparency and conversion efficiency of Cr<sup>4+</sup> ions in Cr: YAG transparent ceramics // *Journal of the American Ceramic Society*. 2015. V. 98. N 8. P. 2459–2464. <https://doi.org/10.1111/jace.13616>
16. Zhou T., Zhang L., Shao C., Sun B., Bu W., Yang H., Chen H., Selim F.A., Zhang Q. Sintering additives regulated Cr ion charge state in Cr doped YAG transparent ceramics // *Ceramics International*. 2018. V. 44. N 12. P. 13820–13826. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.226>
17. Chaika M.A., Mancardi G., Vovk O.M. Influence of CaO and SiO<sub>2</sub> additives on the sintering behavior of Cr,Ca:YAG ceramics prepared by solid-state reaction sintering // *Ceramics International*. 2020. V. 46. N 14. P. 22781–22786. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.045>
18. Chaika M.A., Dulina N.A., Doroshenko A.G., Parkhomenko S.V., Gayduk O.V., Tomala R., Strek W., Hreniak D., Mancardi G., Vovka O.M. Influence of calcium concentration on formation of tetravalent chromium doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics // *Ceramics International*. 2018. V. 44. N 12. P. 13513–13519. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.182>
19. Chaika M.A., Dluzewski P., Morawiec K., Szczepansk A., Jablonska K., Mancardi G., Tomala R., Hreniak D., Strek W., Safronova N.A., Doroshenko A.G., Parkhomenko S.V., Vovk O.M. The role of Ca<sup>2+</sup> ions in the formation of high optical quality Cr<sup>4+</sup>,Ca:YAG ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. 2019. V. 39. N 11. P. 3344–3352. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.04.037>
20. Bezotosnyi V.V., Kanaev A.Yu., Kopylov Yu.L., Koromyslov A.L., Lopukhin K.V., Tupitsyn I. M., Cheshev E.A. Influence of CaO/MgO ratio on Cr<sup>3+</sup> to Cr<sup>4+</sup> conversion efficiency in YAG:Cr<sup>4+</sup> ceramic
6. Ikesue A., Yoshida K., Kamata K. Transparent Cr<sup>4+</sup>-doped YAG ceramics for tunable lasers. *Journal of the American Ceramic Society*, 1996, vol. 79, no. 2, pp. 507–509. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08154.x>
7. Li J., Wu Y., Pan Y., Guo J. Fabrication of Cr<sup>4+</sup>,Nd<sup>3+</sup>:YAG transparent ceramics for self-Q-switched laser. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, vol. 352, no. 23–25, pp. 2404–2407. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.02.062>
8. Kong L.B., Huang Y., Que W., Zhang T., Li S., Zhang J., Dong Z., Tang D. *Transparent Ceramics*. Springer Cham, 2015, 734 p. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18956-7>
9. Zhou T., Zhang L., Li Z., Wei S., Wu J., Wang L., Yang H., Fu Z., Chen H., Wong C., Zhang Q. Enhanced conversion efficiency of Cr<sup>4+</sup> ion in Cr: YAG transparent ceramic by optimizing the annealing process and doping concentration. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 703, pp. 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.338>
10. Yagi H., Takaichi K., Ueda K., Yanagitani T., Kaminskii A. Influence of annealing conditions on the optical properties of chromium-doped ceramic Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>. *Optical Materials*, 2006, vol. 29, no. 4, pp. 392–396. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2005.08.035>
11. Chaika M., Paszkowicz W., Strek W., Hreniak D., Tomala R., Safronova N., Doroshenko A., Parkhomenko S., Dluzewski P., Kozłowski M., Vovk O. Influence of Cr doping on the phase composition of Cr,Ca:YAG ceramics by solid state reaction sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, vol. 102, no. 4, pp. 2104–2115. <https://doi.org/10.1111/jace.16024>
12. Chaika M., Tomala R., Strek W., Hreniak D., Dluzewski P., Morawiec K., Mateychenko P., Fedorov A., Doroshenko A., Parkhomenko S., Lesniewska-Matys K., Podniesinski D., Kozłowska A., Mancardi G., Vovk O. Kinetics of Cr<sup>3+</sup> to Cr<sup>4+</sup> ion valence transformations and intra-lattice cation exchange of Cr<sup>4+</sup> in Cr,Ca:YAG ceramics used as laser gain and passive Q-switching media. *Journal of Chemical Physics*, 2019, vol. 151, no. 13, pp. 134708. <https://doi.org/10.1063/1.5118321>
13. Feldman R., Shimony Y., Burshtein Z. Dynamics of chromium ion valence transformations in Cr,Ca:YAG crystals used as laser gain and passive Q-switching media. *Optical Materials*, 2003, vol. 24, no. 1–2, pp. 333–344. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(03\)00146-0](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(03)00146-0)
14. Boulesteix R., Perrière C., Maître A., Chrétien L., Brenier A., Guyotd Y. Fabrication of YAG/Cr:YAG transparent composite ceramics and characterization by light sheet fluorescence imaging. *Optical Materials*, 2019, vol. 96, pp. 109324. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109324>
15. Zhou T., Zhang L., Yang H., Qiao X., Liu P., Tang D., Zhang J. Effects of sintering AIDS on the transparency and conversion efficiency of Cr<sup>4+</sup> ions in Cr: YAG transparent ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, vol. 98, no. 8, pp. 2459–2464. <https://doi.org/10.1111/jace.13616>
16. Zhou T., Zhang L., Shao C., Sun B., Bu W., Yang H., Chen H., Selim F.A., Zhang Q. Sintering additives regulated Cr ion charge state in Cr doped YAG transparent ceramics. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, no. 12, pp. 13820–13826. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.226>
17. Chaika M.A., Mancardi G., Vovk O.M. Influence of CaO and SiO<sub>2</sub> additives on the sintering behavior of Cr,Ca:YAG ceramics prepared by solid-state reaction sintering. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, no. 14, pp. 22781–22786. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.045>
18. Chaika M.A., Dulina N.A., Doroshenko A.G., Parkhomenko S.V., Gayduk O.V., Tomala R., Strek W., Hreniak D., Mancardi G., Vovka O.M. Influence of calcium concentration on formation of tetravalent chromium doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, no. 12, pp. 13513–13519. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.182>
19. Chaika M.A., Dluzewski P., Morawiec K., Szczepansk A., Jablonska K., Mancardi G., Tomala R., Hreniak D., Strek W., Safronova N.A., Doroshenko A.G., Parkhomenko S.V., Vovk O.M. The role of Ca<sup>2+</sup> ions in the formation of high optical quality Cr<sup>4+</sup>,Ca:YAG ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, vol. 39, no. 11, pp. 3344–3352. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.04.037>
20. Bezotosnyi V.V., Kanaev A.Yu., Kopylov Yu.L., Koromyslov A.L., Lopukhin K.V., Tupitsyn I. M., Cheshev E.A. Influence of CaO/MgO ratio on Cr<sup>3+</sup> to Cr<sup>4+</sup> conversion efficiency in YAG:Cr<sup>4+</sup> ceramic

- saturable absorbers // *Optical Materials*. 2020. V. 100. P. 109671. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109671>
21. Chen X., Wu Y., Lu Z., Wei N., Qi J., Shi J., Hua T., Zeng Q., Guo W., Lu T. Assessment of conversion efficiency of Cr<sup>4+</sup> ions by aliovalent cation additives in Cr:YAG ceramic for edge cladding // *Journal of the American Ceramic Society*. 2018. V. 101. N 11. P. 5098–5109. <https://doi.org/10.1111/jace.15764>
  22. Chen X., Lu T., Wei N., Lu Z., Chen L., Zhang Q., Cheng G., Qi J. Fabrication and photoluminescence properties of Cr:YAG and Yb,Cr:YAG transparent ceramic // *Optical Materials*. 2015. V. 49. P. 330–336. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.09.022>
  23. Doroshenko A.G., Yavetskiy R.P., Parkhomenko S.V., Vorona I.O., Kryzhanovska O.S., Mateychenko P.V., Tolmachev A.V., Vovk E.A., Bovda V.A., Croitoru G., Gheorghe L. Effect of the sintering temperature on the microstructure and optical properties of YAG:Cr,Mg ceramics // *Optical Materials*. 2019. V. 98. P. 109505. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109505>
  24. Kravtsov A.A., Nikova M.S., Vakalov D.S., Tarala V.A., Chikulina I.S., Malyavin F.F., Chapura O.M., Krandievsky S.O., Kuleshov D.S., Lapin V.A. Combined effect of MgO sintering additive and stoichiometry deviation on YAG crystal lattice defects // *Ceramics International*. 2019. V. 45. N 16. P. 20178–20188. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.287>
  25. Малявин Ф.Ф., Кравцов А.А., Тарала В.А., Никова М.С., Чикулина И.С., Вакалов Д.С., Лапин В.А., Кулешов Д.С., Медяник Е.В. Исследование влияния концентрации оксида магния и отклонения от стехиометрии иттрий-алюминиевого граната на микроструктуру и оптическое пропускание керамики на его основе // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 6. С. 872–879. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-872-879>
  26. Kravtsov A.A., Chikulina I.S., Tarala V.A., Evtushenko E.A., Shama M.S., Tarala L.V., Malyavin F.F., Vakalov D.S., Lapin V.A., Kuleshov D.S. Novel synthesis of low-agglomerated YAG:Yb ceramic nanopowders by two-stage precipitation with the use of hexamine // *Ceramics International*. 2019. V. 45. N 1. P. 1273–1282. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.010>
  27. Malyavin F.F., Tarala V.A., Kuznetsov S.V., Kravtsov A.A., Chikulina I.S., Shama M.S., Medyanik E.V., Ziryanov V.S., Evtushenko E.A., Vakalov D.S., Lapin V.A., Kuleshov D.S., Tarala L.V., Mitrofanenko L.M. Influence of the ceramic powder morphology and forming conditions on the optical transmittance of YAG:Yb ceramics // *Ceramics International*. 2019. V. 45. N 4. P. 4418–4423. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.119>
  28. Chen X., Lu Z., Hu M., Chang H., Duan Y., Fang J., Lu T., Wei N., Wu Y., Guo W. Investigation of the structure, optical properties and Cr<sup>4+</sup> conversion level of Yb<sup>3+</sup> and Cr<sup>3+</sup> codoped YAG transparent ceramics // *Optical Materials*. 2020. V. 109. P. 110406. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110406>
  29. Wu Y., Li J., Qiu F., Pan Y., Liu Q., Guo J. Fabrication of transparent Yb,Cr:YAG ceramics by a solid-state reaction method // *Ceramics International*. 2006. V. 32. N 7. P. 785–788. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.06.002>
  - saturable absorbers. *Optical Materials*, 2020, vol. 100, pp. 109671. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109671>
  21. Chen X., Wu Y., Lu Z., Wei N., Qi J., Shi J., Hua T., Zeng Q., Guo W., Lu T. Assessment of conversion efficiency of Cr<sup>4+</sup> ions by aliovalent cation additives in Cr:YAG ceramic for edge cladding. *Journal of the American Ceramic Society*, 2018, vol. 101, no. 11, pp. 5098–5109. <https://doi.org/10.1111/jace.15764>
  22. Chen X., Lu T., Wei N., Lu Z., Chen L., Zhang Q., Cheng G., Qi J. Fabrication and photoluminescence properties of Cr:YAG and Yb,Cr:YAG transparent ceramic. *Optical Materials*, 2015, vol. 49, pp. 330–336. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.09.022>
  23. Doroshenko A.G., Yavetskiy R.P., Parkhomenko S.V., Vorona I.O., Kryzhanovska O.S., Mateychenko P.V., Tolmachev A.V., Vovk E.A., Bovda V.A., Croitoru G., Gheorghe L. Effect of the sintering temperature on the microstructure and optical properties of YAG:Cr,Mg ceramics. *Optical Materials*, 2019, vol. 98, pp. 109505. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109505>
  24. Kravtsov A.A., Nikova M.S., Vakalov D.S., Tarala V.A., Chikulina I.S., Malyavin F.F., Chapura O.M., Krandievsky S.O., Kuleshov D.S., Lapin V.A. Combined effect of MgO sintering additive and stoichiometry deviation on YAG crystal lattice defects. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, no. 16, pp. 20178–20188. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.287>
  25. Malyavin F.F., Kravtsov A.A., Tarala V.A., Nikova M.S., Chikulina I.S., Vakalov D.S., Lapin V.A., Kuleshov D.S., Medyanik E.V. Impact of magnesium oxide concentration and yttrium-aluminum garnet stoichiometry deviation on the microstructure and optical transmission of yag-based ceramics. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, vol. 21, no. 6, pp. 872–879. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-872-879>
  26. Kravtsov A.A., Chikulina I.S., Tarala V.A., Evtushenko E.A., Shama M.S., Tarala L.V., Malyavin F.F., Vakalov D.S., Lapin V.A., Kuleshov D.S. Novel synthesis of low-agglomerated YAG:Yb ceramic nanopowders by two-stage precipitation with the use of hexamine. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, no. 1, pp. 1273–1282. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.010>
  27. Malyavin F.F., Tarala V.A., Kuznetsov S.V., Kravtsov A.A., Chikulina I.S., Shama M.S., Medyanik E.V., Ziryanov V.S., Evtushenko E.A., Vakalov D.S., Lapin V.A., Kuleshov D.S., Tarala L.V., Mitrofanenko L.M. Influence of the ceramic powder morphology and forming conditions on the optical transmittance of YAG:Yb ceramics. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, no. 4, pp. 4418–4423. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.119>
  28. Chen X., Lu Z., Hu M., Chang H., Duan Y., Fang J., Lu T., Wei N., Wu Y., Guo W. Investigation of the structure, optical properties and Cr<sup>4+</sup> conversion level of Yb<sup>3+</sup> and Cr<sup>3+</sup> codoped YAG transparent ceramics. *Optical Materials*, 2020, vol. 109, pp. 110406. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110406>
  29. Wu Y., Li J., Qiu F., Pan Y., Liu Q., Guo J. Fabrication of transparent Yb,Cr:YAG ceramics by a solid-state reaction method. *Ceramics International*, 2006, vol. 32, no. 7, pp. 785–788. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.06.002>

### Авторы

**Малявин Федор Федорович** — заведующий лабораторией, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355009, Российская Федерация, [sc 55748614600](https://orcid.org/0000-0002-5255-9346), <https://orcid.org/0000-0002-5255-9346>, [fedormalyavin@mail.ru](mailto:fedormalyavin@mail.ru)

**Кравцов Александр Александрович** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южного научного центра Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация; научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355009, Российская Федерация, [sc 57191056680](https://orcid.org/0000-0002-0645-1166), <https://orcid.org/0000-0002-0645-1166>, [sanya-kravtsov@yandex.ru](mailto:sanya-kravtsov@yandex.ru)

**Тарала Виталий Алексеевич** — кандидат химических наук, заведующий научно-лабораторным комплексом, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355009, Российская Федерация, [sc 36873277700](https://orcid.org/0000-0001-6688-2681), <https://orcid.org/0000-0001-6688-2681>, [vitaly-tarala@yandex.ru](mailto:vitaly-tarala@yandex.ru)

**Чикулина Ирина Сергеевна** — заведующий лабораторией, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355009,

### Authors

**Fedor F. Malyavin** — Head of Laboratory, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355009, Russian Federation, [sc 55748614600](https://orcid.org/0000-0002-5255-9346), <https://orcid.org/0000-0002-5255-9346>, [fedormalyavin@mail.ru](mailto:fedormalyavin@mail.ru)

**Alexander A. Kravtsov** — PhD, Senior Researcher, Federal Research Center of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; Scientific Researcher, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355009, Russian Federation, [sc 57191056680](https://orcid.org/0000-0002-0645-1166), <https://orcid.org/0000-0002-0645-1166>, [sanya-kravtsov@yandex.ru](mailto:sanya-kravtsov@yandex.ru)

**Vitaly A. Tarala** — PhD (Chemistry), Head of Laboratory Complex, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355009, Russian Federation, [sc 36873277700](https://orcid.org/0000-0001-6688-2681), <https://orcid.org/0000-0001-6688-2681>, [vitaly-tarala@yandex.ru](mailto:vitaly-tarala@yandex.ru)

**Irina S. Chikulina** — Head of Laboratory, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355009, Russian Federation, [sc 57204186833](https://orcid.org/0000-0002-0871-8776), <https://orcid.org/0000-0002-0871-8776>, [iraaa@yandex.ru](mailto:iraaa@yandex.ru)



Российская Федерация, [sc 57204186833](https://orcid.org/0000-0002-0871-8776), <https://orcid.org/0000-0002-0871-8776>, [iraaaa@yandex.ru](mailto:iraaaa@yandex.ru)

**Вакалов Дмитрий Сергеевич** — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355009, Российская Федерация, [sc 57204185431](https://orcid.org/0000-0001-6788-3811), <https://orcid.org/0000-0001-6788-3811>, [megadims@gmail.com](mailto:megadims@gmail.com)

**Лапин Вячеслав Анатольевич** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южного научного центра Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация; научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355009, Российская Федерация, [sc 55748317300](https://orcid.org/0000-0002-1938-4134), <https://orcid.org/0000-0002-1938-4134>, [viacheslavlapin@yandex.ru](mailto:viacheslavlapin@yandex.ru)

**Никова Марина Сергеевна** — кандидат технических наук, инженер, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355009, Российская Федерация, [sc 57214126664](https://orcid.org/0000-0001-8810-4493), <https://orcid.org/0000-0001-8810-4493>, [m-s-shama@yandex.ru](mailto:m-s-shama@yandex.ru)

**Хорошилова Светлана Эдуардовна** — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355009, Российская Федерация, [sc 23990875300](https://orcid.org/0000-0002-4287-8183), <https://orcid.org/0000-0002-4287-8183>, [skhoroshilova@ncfu.ru](mailto:skhoroshilova@ncfu.ru)

**Медяник Евгений Викторович** — ведущий инженер, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355009, Российская Федерация, [sc 57204793700](https://orcid.org/0000-0002-5947-7810), <https://orcid.org/0000-0002-5947-7810>, [miedianik84@mail.ru](mailto:miedianik84@mail.ru)

**Кулешов Дмитрий Сергеевич** — инженер, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355009, Российская Федерация, [sc 55748259500](https://orcid.org/0000-0003-4314-1578), <https://orcid.org/0000-0003-4314-1578>, [kule-dmitry@yandex.ru](mailto:kule-dmitry@yandex.ru)

**Dmitry S. Vakalov** — PhD (Physics & Mathematics), Head of Laboratory, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355009, Russian Federation, [sc 57204185431](https://orcid.org/0000-0001-6788-3811), <https://orcid.org/0000-0001-6788-3811>, [megadims@gmail.com](mailto:megadims@gmail.com)

**Viacheslav A. Lapin** — PhD, Senior Researcher, Federal Research Center of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; Scientific Researcher, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355009, Russian Federation, [sc 55748317300](https://orcid.org/0000-0002-1938-4134), <https://orcid.org/0000-0002-1938-4134>, [viacheslavlapin@yandex.ru](mailto:viacheslavlapin@yandex.ru)

**Marina S. Nikova** — PhD, Engineer, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355009, Russian Federation, [sc 57214126664](https://orcid.org/0000-0001-8810-4493), <https://orcid.org/0000-0001-8810-4493>, [m-s-shama@yandex.ru](mailto:m-s-shama@yandex.ru)

**Svetlana E. Khoroshilova** — PhD (Chemistry), Leading Researcher, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355009, Russian Federation, [sc 23990875300](https://orcid.org/0000-0002-4287-8183), <https://orcid.org/0000-0002-4287-8183>, [skhoroshilova@ncfu.ru](mailto:skhoroshilova@ncfu.ru)

**Evgenii V. Medyanik** — Leading Engineer, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355009, Russian Federation, [sc 57204793700](https://orcid.org/0000-0002-5947-7810), <https://orcid.org/0000-0002-5947-7810>, [miedianik84@mail.ru](mailto:miedianik84@mail.ru)

**Dmitry S. Kuleshov** — Engineer, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355009, Russian Federation, [sc 55748259500](https://orcid.org/0000-0003-4314-1578), <https://orcid.org/0000-0003-4314-1578>, [kule-dmitry@yandex.ru](mailto:kule-dmitry@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 23.06.2022  
Одобрена после рецензирования 27.07.2022  
Принята к печати 23.09.2022

Received 23.06.2022  
Approved after reviewing 27.07.2022  
Accepted 23.09.2022



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»