

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$ И КРИСТАЛЛОВ, СОЛЕГИРОВАННЫХ ПРИМЕСЯМИ: Sc И Sc+Ca

© 2017 г. В.М. КАСИМОВА<sup>1</sup>, О.А. БУЗАНОВ<sup>2</sup>, Н.С. КОЗЛОВА<sup>1</sup>,  
А.П. КОЗЛОВА<sup>1</sup>, Д.А. СПАСКИЙ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва,

<sup>2</sup>ОАО «Фомос-Материалс», г. Москва,

<sup>3</sup>НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

e-mail: kasimovavalya@mail.ru

### Введение

В последнее время возрос спрос на новые сцинтилляционные материалы. Наибольший интерес представляют оксидные монокристаллы (рис. 1).

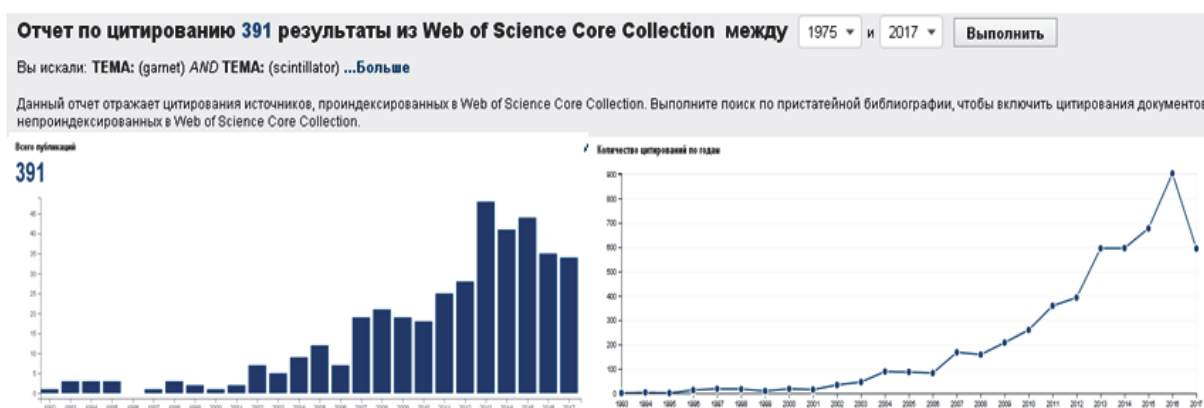


Рис. 1. Цитирование и публикация статей по данным Web of Science [1].

Ранее в работах [2,3,4] были представлены результаты исследования монокристаллического гадолиний - алюминий - галлиевого граната, легированного церием ( $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$ , GGAG:Ce), который относится к кристаллам кубической сингонии с пространственной группой симметрии  $Ia\bar{3}d$ .

Структура монокристалла  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$  имеет следующий вид: гадолиний (Gd) занимает позицию А – «додекаэдр», алюминий (Al) и галлий (Ga) могут находиться как в позиции В – «октаэдр», так и в позиции С - «тетраэдр» (рис. 2). При легировании церий встраивается в кристаллическую решетку вместо Gd. Все координационные многогранники сформированы кислородом (O).

Легирование церием является необходимым условием для получения сцинтилляционных свойств, поскольку электронные переходы данного элемента сопровождаются излучением света [5].

Монокристалл GGAG:Ce обладает рядом преимуществ: высоким значением световых выходов, низким энергетическим разрешением, достаточно высокой плотностью, отсутствием гигроскопичности и др. Тем не менее у данного материала существует недостаток в виде большого вклада длительных компонент в кинетику затухания ( $> 100$  нс), тогда как значение быстрой компоненты составляет 88 нс [6]. В связи с данной проблемой исследователями предложены разные способы уменьшения времени

послесвечения, одним из них является солегирирование монокристаллов GAGG:Ce другими элементами (введение в матрицу  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$  дополнительных примесей, помимо церия).

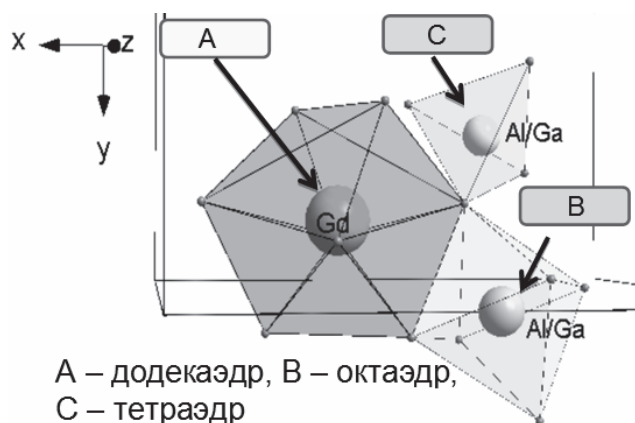


Рис. 2. Структура  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ .

В данной работе исследуются сцинтилляционные кристаллы следующего состава:  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$  (GAGG:Ce),  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce,Sc$  (GAGG:Ce,Sc) и  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce,Sc+Ca$  (GAGG:Ce,Sc+Ca).

Целью данной работы является исследование оптических и люминесцентных характеристик кристаллов GAGG:Ce, солегирированных Sc и Sc+Ca.

#### Методика исследования

В работе исследованы спектральные зависимости пропускания, отражения, поглощения и люминесценции. Спектрофотометрическим методом измерены показатели преломления этих кристаллов. Кристаллы выращены в компании ОАО «Фомос-Материалс». Все исследования оптических свойств проведены спектрофотометрическими методами на спектрофотометре «Cary 5000» с приставкой «Universal Measurement Accessory» («UMA») фирмы «Аджилент Текнолоджиз» в диапазоне длин волн (250-2500 нм). Люминесцентные свойства были исследованы на установке для люминесцентной спектроскопии отдела ФПКЭ НИИЯФ МГУ. Измерены спектры возбуждения и люминесценции при комнатной температуре и энергии возбуждения, соответствующей  $\lambda = 340$  нм.

Исследованные образцы были изготовлены в виде полированных с двух сторон пластин, внешний вид которых представлен на рис. 3.

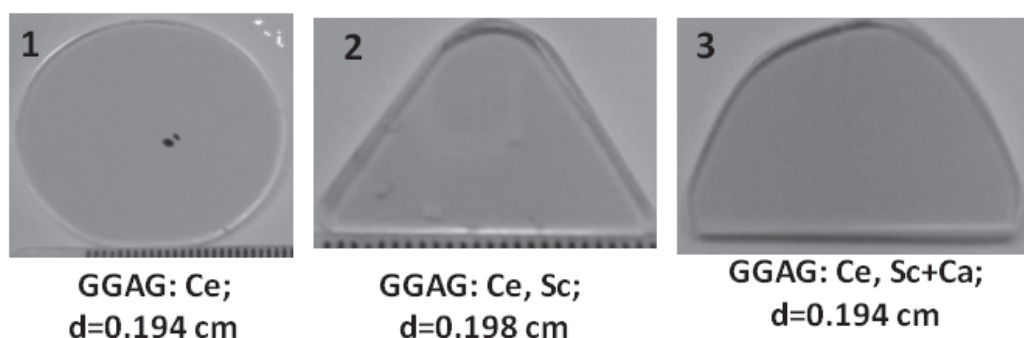


Рис. 3. Внешний вид исследуемых образцов.

Спектрофотометр «Cary 500» с приставкой «UMA» благодаря возможности вращения детектора и образца позволяет провести измерения угловых зависимостей коэффициента отражения Р-поляризованного света с наименьшим шагом  $0,04^\circ$  для определения угла Брюстера по схеме, изображенной на рис. 4.

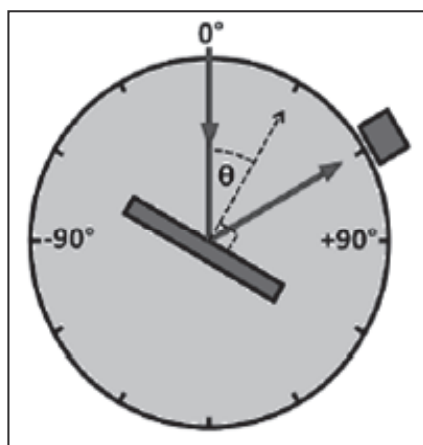


Рис. 4. Схема измерения коэффициента отражения.

Для установления доверительного интервала метода проведены метрологические испытания на эталонном образце. Точность метода определения показателя преломления составила 0,01.

Значения показателей поглощения  $\alpha$  определялись по закону Бугера-Ламберта. Подробное описание данных методов измерения  $\alpha$  и  $n$  представлено в работах [3,4].

### Результаты

Спектральные зависимости показателя поглощения  $\alpha$  солегированных Sc и Sc+Ca кристаллов, полученные при нормальном падении света, изображены на рис. 5.

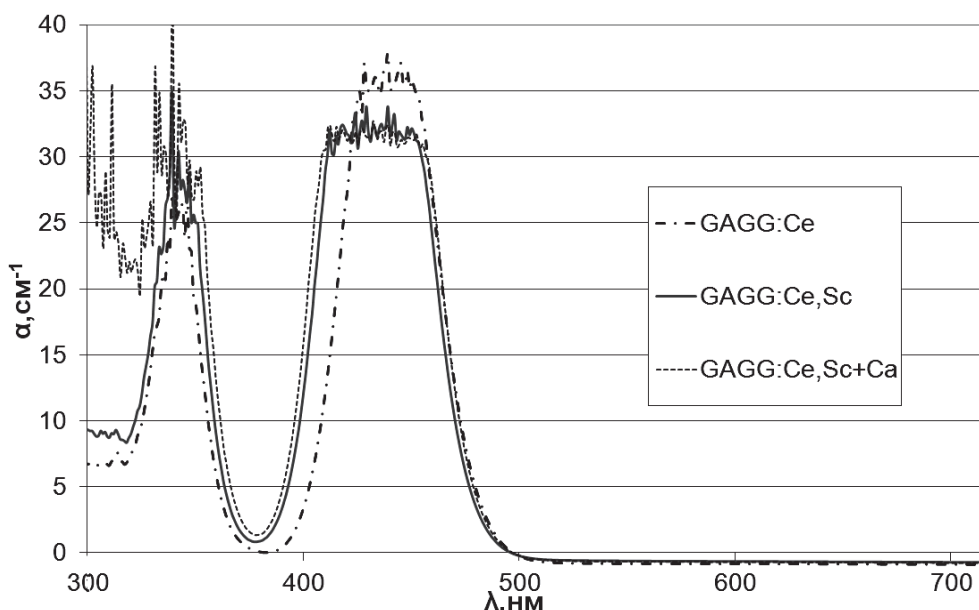


Рис. 5. Спектры поглощения кристаллов GAGG:Ce, GAGG:Ce,Sc и GAGG:Ce,Sc+Ca.

Спектры поглощения кристаллов GAGG:Ce, солегированных Sc и Sc+Ca, являются немонотонными зависимостями с сильными полосами поглощения:

- широкая полоса в области  $\lambda_{\max} = 440$  нм;
- полоса с максимумом при  $\lambda = 340$  нм.

В коротковолновой области примеси Sc+Ca оказывают значительное влияние на поглощающую способность (в сторону ее увеличения), Sc слегка увеличивает значение  $\alpha$ ;

В области, соответствующей длине волны  $\lambda = 440$  нм, примеси Sc и Sc+Ca уменьшают поглощение.

По закону Брюстера были получены значения показателей преломления на 5 длинах волн, а далее проведена аппроксимация результатов по уравнению Коши, показывающая хорошую согласованность измеренных показателей преломления. На рис. 6 представлены экспериментальные дисперсионные зависимости  $n(\lambda)$ .

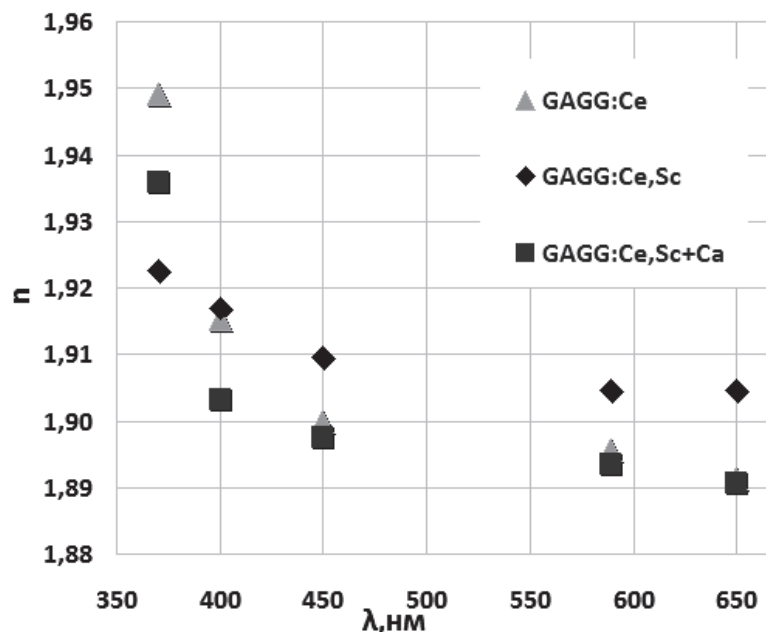


Рис. 6. Показатели преломления кристаллов GAGG:Ce, GAGG:Ce,Sc и GAGG:Ce,Sc+Ca.

На рис. 7 (а, б) представлены нормированные спектры люминесценции, полученные при энергии возбуждения, соответствующей длине волны  $\lambda = 340$  нм.

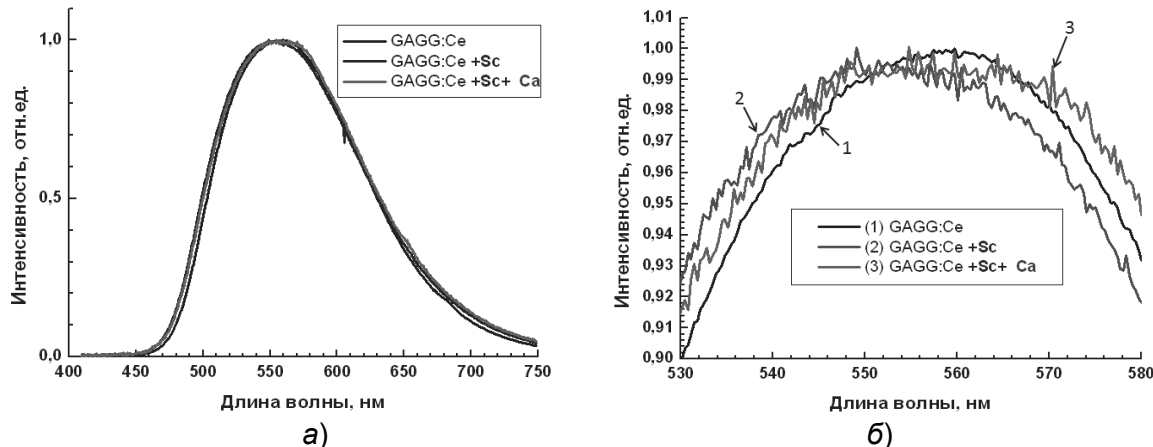


Рис. 7. Люминесценция кристаллов GAGG:Ce, GAGG:Ce,Sc и GAGG:Ce,Sc+Ca (а) и приближенная область максимума люминесценции (б).

По полученным результатам установлено, что максимум высвечивания GAGG:Ce соответствует длине волны  $\lambda = 558$  нм, а для солегированных Sc и Sc+Ca кристаллов максимум смещен на длины волн  $\lambda = 554$  и  $559$  нм, соответственно.

### Заключение

В процессе выполнения работы получены спектральные зависимости показателя поглощения для кристаллов GAGG:Ce, солегированных примесью Sc и Sc+Ca, с ярко выраженными полосами поглощения при  $\lambda = 440$  нм и  $\lambda = 340$  нм. Согласно результатам по показателям поглощения, примеси оказывают заметное влияние на значение  $\alpha$ .

Анализ литературных данных показал отсутствие данных об оценке показателя преломления для кристаллов GAGG:Ce,Sc и GAGG:Ce,Sc+Ca. Соответственно, в данной работе с помощью закона Брюстера впервые получены значения показателей преломления и построены экспериментальные дисперсионные зависимости  $n(\lambda)$ .

Спектры люминесценции при  $T = 300\text{K}$ , получены при энергии возбуждения, соответствующей длине волны  $\lambda = 340\text{ нм}$ . Установлено смещение максимума высвечивания при солегировании примесями Sc и Sc+Ca (с длины волны  $\lambda = 558\text{ нм}$  на длины волн  $\lambda = 554$  и  $559\text{ нм}$ , соответственно).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет по цитированию // Web of Science. – URL: [https://apps.webofknowledge.com/CitationReport.do?product=WOS&search\\_mode=CitationReport&SID=Y2t4UsLUAcBFLSzpdIH&page=1&cr\\_pqid=5&viewType=summary&colName=WOS](https://apps.webofknowledge.com/CitationReport.do?product=WOS&search_mode=CitationReport&SID=Y2t4UsLUAcBFLSzpdIH&page=1&cr_pqid=5&viewType=summary&colName=WOS) (дата обращения 19.07.2017).
2. Касимова В.М., Бузанов О.А., Козлова Н.С. и др. Сцинтилляционный материал  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$  // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 79-82.
3. Касимова В.М., Бузанов О.А., Козлова Н.С. и др. Оптические свойства кристаллов  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$  // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 24-27.
4. Оптические свойства и показатели преломления кристаллов  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  / Н.С. Козлова, О.А. Бузанов, Е.В. Забелина и др. // Кристаллография. – 2016, т. 61, № 3, с. 457–461.
5. Шендрик Р.Ю. Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Часть 3. Введение в физику сцинтилляторов – 1. – Иркутск: изд-во Иркут. гос. ун-та., 2013, 110 с.
6. Physical and Scintillation Properties // Furukawa. – URL: <http://www.furukawadenshi.co.jp/cgi-bin/pdfdata/20140428162950.pdf> (дата обращения 19.07.2017).