

Научная статья
УДК 541.35
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.006

САМОСВЕТАЮЩИЕСЯ ШИРОКОЗОННЫЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ РАДИОНУКЛИДАМИ

**Мария Владимировна Заморянская¹, Борис Евгеньевич Бураков²,
Екатерина Владимировна Дементьева³, Ксения Николаевна Орехова⁴,
Григорий Андреевич Гусев⁵, Влад Андреевич Кравец⁶, Александр Никитович Трофимов⁷**

^{1–7}Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

¹zam@mail.ioffe.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1859-2721>

Аннотация

Приведены результаты синтеза и исследования кристаллических материалов на основе широкозонных сложных оксидов и алмазов, активированных радионуклидами. Представлены результаты исследования полученных материалов, изучены спектры их самосвечения, рассмотрены возможности их использования в науке и технике.

Ключевые слова:

ионы редкоземельных элементов, радионуклиды, люминесценция, сцинтилляторы, широкозонные оксидные материалы, алмазы

Благодарности:

статья выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания ФТИ им. А. Ф. Иоффе № FFUG-2024-0024.

Финансирование:

государственное задание по теме FFUG-2024-0024.

Для цитирования:

Самосветящиеся широкозонные кристаллические материалы, активированные радионуклидами / М. В. Заморянская [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 38–42. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.006.

Original article

SELF-GLOWING WIDE-BAND CRYSTALLINE MATERIALS ACTIVATED BY RADIONUCLIDES

**Maria V. Zamoryanskaya¹, Boris E. Burakov², Ekaterina V. Dementeva³, Ksenia N. Orekhova⁴,
Grigory A. Gusev⁵, Vlad A. Kravets⁶, Alexander N. Trofimov⁷**

^{1–7}Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

¹zam@mail.ioffe.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1859-2721>

Abstract

The results of the synthesis and study of crystalline materials based on wide-band complex oxides and diamonds activated by radionuclides are presented. The results of the study of the obtained materials are presented, their self-luminescence spectra are studied, and the possibilities of their use in science and technology are considered.

Keywords:

rare earth ions, radionuclides, luminescence, scintillators, wide band gap oxide materials, diamonds

Acknowledgments:

The article was prepared with the support of the federal budget on the topic of the state assignment for Ioffe Institute № FFUG-2024-0024.

Funding:

State task on the topic of research No FFUG-2024-0024.

For citation:

Self-glowing wide-band crystalline materials activated by radionuclides / M. V. Zamoryanskaya [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 38–42. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.006.

Введение

Развитие ядерной промышленности сопровождается накоплением значительных объемов радиоактивных материалов, представляющих долговременную экологическую опасность. Проблема безопасного обращения с данными материалами и их окончательная изоляция (захоронение) не решена ни в одной стране мира. В значительной степени это обусловлено чрезвычайно высокой стоимостью глубинного подземного захоронения. Альтернативой захоронивания радиоактивных отходов является извлечение актиноидов из отходов и их безопасное длительное использование. Эта же проблема касается радиоактивного изотопа углерода ^{14}C .

Наиболее перспективным направлением является введение радионуклидов в качестве структурной примеси в химически, механически и радиационно стойкие кристаллические матрицы. Одним из вариантов применения кристаллических матриц, содержащих радионуклиды в виде структурной примеси, является создание автономных источников оптического излучения. Если кристаллические матрицы обладают высокими сцинтилляционными свойствами, то энергия радиоактивного распада будет стимулировать оптическое излучение сцинтиллятора, он станет самосветящимся в течение всего времени спонтанного распада радионуклида. Такой источник оптического излучения не требует специальной утилизации и будет удерживать радионуклид миллионы лет. При этом такие материалы будут источниками оптического излучения в течение двух — двух с половиной периодов полураспада актиноида (для Pu-238 это пара сотен лет, а для Am-241 — тысяча лет, C-14 — 10 000 лет). Это направление исследования представляется перспективным для практического использования. Оптическое излучение самосветящейся матрицы можно преобразовать в электрический ток с помощью фотопреобразователя. В этом случае источники оптического излучения могут быть основой для ядерной батарейки — маломощного источника тока. Также такие материалы могут найти применение в сенсорах, состоящих из источника излучения — приемника для идентификации содержания различных газов в атмосфере. Перспективным представляется использование таких источников оптического излучения в робототехнике в качестве элемента оптоэлектронной пары.

Результаты

Наиболее привлекательными радионуклидами для разработки самосветящихся материалов являются альфа- и бета-излучатели. Это связано с тем, что альфа- и бета-частицы имеют небольшие длины пробега в твердом теле, и при торможении почти вся энергия частиц (энергия, связанная с радиораспадом) остается в твердом теле и может быть преобразована в электромагнитное излучение оптического диапазона. В связи с этим радионуклиды из тяжелой фракции радиоактивных отходов, такие как Pu-238 и Am-241 , которые являются альфа-излучателями, являются перспективными элементами для разработки самосветящихся материалов. Энергия альфа-частиц, образующихся в результате радиоактивного распада этих элементов, составляет 5,6–6 МэВ. Длина пробега таких частиц в твердом теле не превышает 15–30 мкм. При распаде радионуклида C-14 образуются бета-частицы с энергией 156 кэВ. Их длина пробега в твердом теле не превышает 50–80 мкм.

Следующим важным вопросом является выбор матрицы, в которой энергия радиораспада преобразуется в оптическое излучение. Эти матрицы должны характеризоваться следующими свойствами: высокая химическая, механическая и радиационная стойкость; эффективное преобразование энергии радиораспада в оптическое излучение (хорошие сцинтилляционные свойства); высокая растворимость радионуклидов в матрице с образованием твердых растворов.

В связи с этим для создания самосветящихся материалов, активированных Pu-238 и Am-241 , наиболее оптимальными являются сложные оксиды, такие как ZrO_2 , ZrSiO_4 , YPO_4 и др. Для радиоизотопа C-14 таким материалом является искусственный алмаз.

В связи с тем что все перечисленные материалы имеют ширину запрещенной зоны от 4,5 эВ и больше, их спектры излучения связаны с внутрицентровыми переходами, а цвет люминесценции определяется электронной структурой этих центров. Для оксидных материалов такими центрами

могут быть ионы переходных металлов, например редкоземельных элементов (Eu^{3+} , Tb^{3+} и др.). Также такими центрами люминесценции могут являться собственные дефекты, например вакансии кислорода в силикате циркона (ZrSiO_4).

Природные и синтетические алмазы могут содержать множество дефектно-примесных центров, активных в люминесценции. В алмазах всех типов при возбуждении квантами с энергией более 5,5 эВ наблюдается широкая бесструктурная «полоса А» в области 2,3–3,2 эВ. В настоящее время признана ее рекомбинационная природа (рекомбинация электронов и дырок на парах донор-акцептор (DA)). В предлагаемой модели центра люминесценции предполагается, что донором является димер азота, а акцептором — бор, замещающий атом углерода.

Были разработаны методы синтеза таких кристаллов и получена серия кристаллов, светящихся в различных оптических диапазонах. Оксидные кристаллы были выращены в лабораторных условиях методом флюса (метод раствора в расплаве) [1; 2]. Искусственный алмаз, обогащенный C-14, был получен методом НРНТ [3].

На рисунках 1 и 2 представлены фотографии полученных кристаллов, активированных радионуклидами.

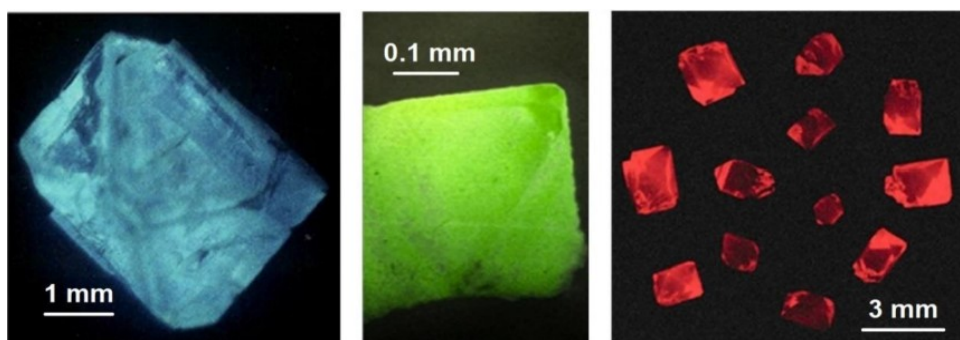


Рис. 1. Фотографии самосвечения оксидных кристаллов, активированных Pu-238 , голубой — $\text{ZrSiO}_4:\text{In}$; зеленый — $\text{ZrSiO}_4:\text{Tb}^{3+}$; красный — $\text{YPO}_4:\text{Eu}^{3+}$

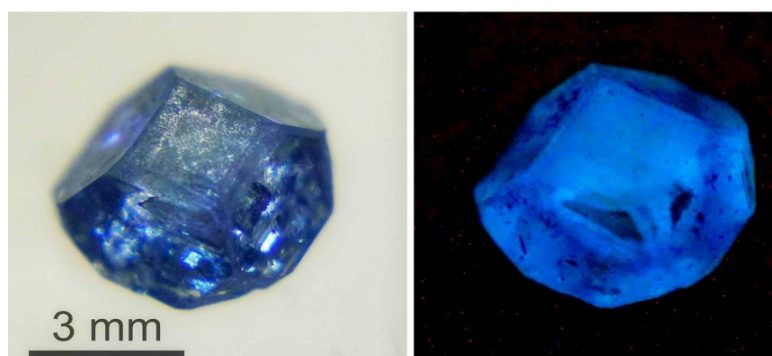


Рис. 2. Фотографии искусственного алмаза, обогащенного C-14, в отраженном свете и самосвечение в темноте

Для всех полученных материалов были исследованы состав, структурные свойства, катодолюминесценция. Спектры самосвечения (рис. 3, 4) были получены на специально разработанном оптическом стенде, и получены сравнительные оценки выхода самосвечения для этих материалов по оригинальной методике с учетом спектральной функции оптического стенда и фотоприемника излучения [4].

Для наиболее интенсивно светящихся материалов был измерен электрический сигнал, возникающий на фотоэлектрическом преобразователе, что подтвердило возможность разработки ядерной батарейки на основе самосветящихся кристаллов.

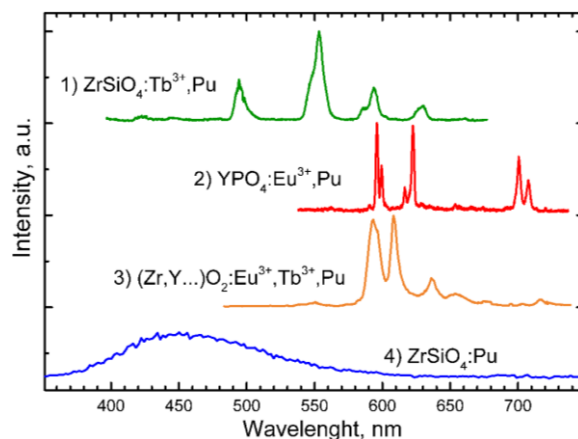


Рис. 3. Спектры самосвечения оксидных кристаллов, активированных Pu–238:
1 — $\text{ZrSiO}_4\text{:Tb}^{3+}$; 2 — $\text{YPO}_4\text{:Eu}^{3+}$; 3 — $(\text{Zr,Y})\text{O}_2\text{:Eu}^{3+}, \text{Tb}^{3+}$; 4 — ZrSiO_4

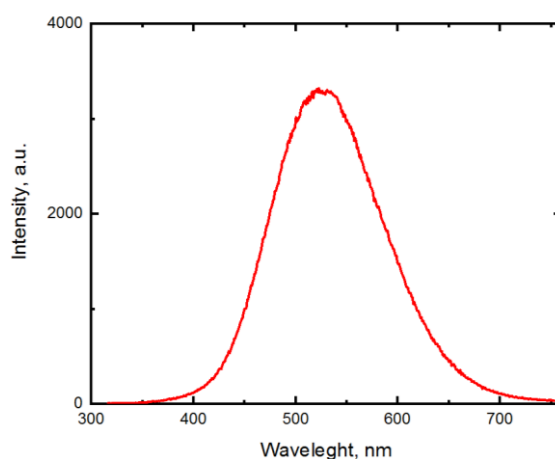


Рис. 4. Спектр самосвечения алмаза, обогащенного C–14

Выводы

Исследования показали принципиальную возможность разработки и получения самосветящихся кристаллов, активированных радионуклидами, источниками альфа- и бета-излучения. Исследованы спектральные характеристики самосвечения, продемонстрирована возможность получения электрического сигнала. В дальнейшем предполагается поиск возможностей для увеличения выхода оптического излучения за счет поиска оптимальных центров люминесценции и уменьшения вероятности безызлучательных переходов за счет уменьшения возможных собственных дефектов в кристаллах.

Список источников

1. Burakov B. E., Domracheva Ya. V., Zamoryanskaya M. V., Petrova M. A., Garbuzov V. M., Kitsay A. A., Zirlin V. A. Development and synthesis of durable self-glowing crystals doped with plutonium. // J. Nucl. Mater. 2009. 385 (1). P. 134–136.

2. Zamoryanskaya M. V., Dementeva E. V., Kravets V. A., Trofimov A. N., Gusev G. A., Ipatova I., Burakov B. E. Self-glowing crystals — radioactive decay energy converters into optical emission // *Mater. Res. Bull.* 2021. 142. 111431.
3. Bocharov S. N., Burakov B. E., Isakov A. I., Orekhova K. N., Dementeva E. V., Zamoryanskaya M. V., Dementev P. A., Ber B. Y., Kasantsev D. Yu., Tokarev M. V., Petrov Yu. Yu. Self-glowing single crystal diamond activated with carbon-14: First synthesis and characterization. *Diam. // Relat. Mat.* 2024. Vol. 141, Art No: #110650.
4. Мягких М. К., Дементьев П. А., Дементьева Е. В., Шерстнев Е. В., Заморянская М. В. Разработка методики количественного сравнения оптической мощности самосветящихся кристаллов // *Письма ЖТФ.* 2024. Т. 50, 7. С. 12–16.

References

1. Burakov B. E., Domracheva Ya. V., Zamoryanskaya M. V., Petrova M. A., Garbuzov V. M., Kitsay A. A., Zirlin V. A. Development and synthesis of durable self-glowing crystals doped with plutonium. *J. Nucl. Mater.*, 2009, 385 (1), pp. 134–136.
2. Zamoryanskaya M. V., Dementeva E. V., Kravets V. A., Trofimov A. N., Gusev G. A., Ipatova I., Burakov B. E. Self-glowing crystals — radioactive decay energy converters into optical emission. *Mater. Res. Bull.*, 2021, 142, 111431.
3. Bocharov S. N., Burakov B. E., Isakov A. I., Orekhova K. N., Dementeva E. V., Zamoryanskaya M. V., Dementev P. A., Ber B. Y., Kasantsev D. Yu., Tokarev M. V., Petrov Yu. Yu. Self-glowing single crystal diamond activated with carbon-14: First synthesis and characterization. *Diam. Relat. Mat.*, 2024, vol. 141, Art No: #110650.
4. Myagkikh M. K., Dementyev P. A., Dementyeva E. V., Sherstnev E. V., Zamoryanskaya M. V. Development of a method for quantitative comparison of the optical power of self-luminous crystals. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 2024, vol. 50, 7, pp. 12–16. (In Russ.).

Информация об авторах

М. В. Заморянская — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией;

Б. Е. Бураков — доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник;

Е. В. Дементьева — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник;

К. Н. Орехова — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник;

Г. А. Гусев — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник;

В. А. Кравец — младший научный сотрудник;

А. Н. Трофимов — научный сотрудник.

Information about the authors

M. V. Zamoryanskaya — DSc (Physics);

B. E. Burakov — DSc (Geology);

E. V. Dementeva — PhD (Physics);

K. N. Orekhova — PhD (Physics);

G. A. Gusev — PhD (Physics);

V. A. Kravets — Research Assistant;

A. N. Trofimov — Researcher.

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена после рецензирования 09.07.2025; принята к публикации 23.07.2025.
The article was submitted 18.06.2025; approved after reviewing 09.07.2025; accepted for publication 23.07.2025.