

Е. О. Митюшкин, А. Н. Солодов, А. Г. Шмелев,
Р. Ф. Ликеров, А. В. Леонтьев, Л. А. Нуртдинова,
Д. К. Жарков, Ю. Г. Галяметдинов, В. Г. Никифоров

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СПЕКТРАЛЬНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛЮМИНОФОРОВ $YVO_4:Bi^{3+}$, Yb^{3+} ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ключевые слова: YVO_4 , висмут, даун-конверсия, иттербий, люминесценция, отжиг, солнечные панели, спектральное преобразование, ультрафиолетовое излучение, фотовольтаика, частица.

Даун-конверсионные частицы YVO_4 , легированные ионами Bi^{3+} и Yb^{3+} , были синтезированы гидротермальным методом и подвергнуты отжигу при температуре 900 °С. Для проведения сравнительного анализа исходного порошка частиц и порошка, прошедшего обработку отжигом, были использованы методы рентгеноструктурного анализа, инфракрасной и люминесцентной спектроскопии. В результате исследования было продемонстрировано стократное увеличение интенсивности даун-конверсионной люминесценции $YVO_4:Bi^{3+}$, Yb^{3+} в ближнем ИК диапазоне у частиц, прошедших высокотемпературную обработку. Улучшение люминесцентных характеристик может быть связано с оптимизацией кристаллических свойств образца и удалением воды, которая могла присутствовать в структуре материала после гидротермального синтеза. Высокотемпературный отжиг имеет потенциал для получения эффективных даун-конверсионных материалов, которые могут быть использованы в кремниевой фотовольтаике для преобразования солнечного света без потерь.

E. O. Mityushkin, A. N. Solodov, A. G. Shmelev,
R. F. Likеров, A. V. Leontyev, L. A. Nurtdinova,
D. K. Zharkov, Yu. G. Galyametdinov, V. G. Nikiforov

THE EFFECT OF ANNEALING ON THE SPECTRAL CONVERSION OF ULTRAVIOLET RADIATION BY THE $YVO_4:Bi^{3+}$, Yb^{3+} PHOSPHOR TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF SOLAR CELLS

Keywords: YVO_4 , bismuth, down-conversion, ytterbium, luminescence, annealing, solar cell, spectral conversion, ultraviolet radiation, photovoltaics, particle.

YVO_4 particles, doped with Bi^{3+} and Yb^{3+} ions, were synthesized using a hydrothermal method and then subjected to thermal annealing at 900°C. X-ray diffraction, infrared spectroscopy, and luminescence spectroscopy were employed to compare the original powder with the annealed sample. The results showed a remarkable increase of 100 times in the down-conversion luminescence of $YVO_4:Bi^{3+}$, Yb^{3+} in the near-infrared region following high-temperature treatment. This improvement can be attributed to the optimization of the crystal structure and the removal of water, which occurs during the hydrothermal synthesis process. High-temperature annealing holds promise for creating efficient down-conversion materials, potentially revolutionizing silicon photovoltaics by enabling lossless conversion of sunlight.

Введение

В последние десятилетия активно ведутся исследования неорганических люминофоров, активированных трехвалентными ионами редкоземельных элементов (РЗЭ) [1, 2]. Особое внимание уделяется материалам, которые демонстрируют явление даун-конверсии, также известное как каскадная или двухфотонная люминесценция [3-6]. Даун-конверсия представляет собой процесс, при котором один поглощенный фотон преобразуется в два фотона меньшей энергии с квантовой эффективностью более 100% [7]. Даун-конверсионные материалы обладают значительным потенциалом для применения в устройствах фотовольтаики в качестве специальных светотрансформирующих покрытий, способствующих существенному повышению их эффективности [8].

Для традиционных кристаллических кремниевых солнечных панелей (с-Si), наиболее распространенных на сегодняшний день, теоретический предел эффективности

преобразования солнечной энергии составляет 33.7% – предел Шокли-Квиссера. На практике достигается эффективность не более 25% [9, 10]. Преобразование фотонов коротковолнового солнечного света с ($E = 1.12$ эВ, $\lambda = 300-500$ нм) в два фотона ближнего инфракрасного (ИК) диапазона с энергией, чуть превышающей ширину запрещенной зоны кремния ($E_g = 1.12$ эВ, $\lambda = 1100$ нм), минимизирует потери энергии из-за термализации носителей заряда [8]. Теоретически установлено, что нанесение светотрансформирующего покрытия на фронтальную поверхность кремниевой солнечной панели позволит повысить ее эффективность до 39% [11].

Среди ионов РЗЭ, подходящих для использования в даун-конверсионных материалах, особое внимание заслуживают ионы иттербия Yb^{3+} . Их единственный излучательный переход $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ обеспечивает люминесценцию в области 1000 нм, что идеально подходит для спектрального преобразования [12, 13]. В качестве матрицы для ионов иттербия может выступать кристалл ортованадата иттрия YVO_4 , имеющий ширину запрещенной зоны, равную 3.8 нм,

и поглощение в области 300 нм [8]. Дополнительное легирование кристалла YVO_4 ионами висмута Bi^{3+} позволяет расширить область поглощения до 400 нм. Таким образом, микро- и наночастицы состава $YVO_4:Bi^{3+}, Yb^{3+}$ являются перспективными даун-конверсионными материалами. Однако практическая реализация эффективного преобразования света сталкивается с рядом проблем, таких как тушение люминесценции из-за дефектов кристаллической решетки, наличия высокочастотных групп-осцилляторов на поверхности и в объеме частиц, а также неоптимальной концентрации ионов РЗЭ [14]. Совершенствование методики синтеза даун-конверсионных частиц, правильный подбор концентрации ионов и использование высокотемпературной обработки синтезированных частиц позволяют устранить указанные проблемы.

В настоящей работе продемонстрировано улучшение интенсивности люминесцентного сигнала ИК диапазона на два порядка для частиц $YVO_4:Bi^{3+}, Yb^{3+}$ после отжига в воздушной атмосфере при температуре 900 °С. Для анализа факторов, способствующих повышению эффективности люминесценции, были применены методы рентгеноструктурного анализа, инфракрасной и люминесцентной спектроскопии.

Экспериментальная часть

Материалы

Натрий ортованадат додекагидрат $Na_3VO_4 \cdot 12H_2O$ (ЗАО «Вектон», Россия, 99%), иттрий(III) нитрат гексагидрат $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ (Sigma-Aldrich, США, 99.8%), иттербий(III) нитрат пентагидрат $Yb(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ (Sigma-Aldrich, США, 99.9%) и висмут(III) нитрат октогидрат $Bi(NO_3)_3 \cdot 8H_2O$ (Sigma-Aldrich, США, 99.7%), были использованы для синтеза $YVO_4:Bi, Yb$ в исходном виде без дополнительной очистки.

Синтез

Люминофор YVO_4 , легированный ионами Bi^{3+} и Yb^{3+} с молярными концентрациями 3% и 10%, соответственно, был получен гидротермальным синтезом. Сначала 4000 мг $Na_3VO_4 \cdot 12H_2O$ было растворено в 200 мл дистиллированной воды для получения прозрачного раствора. Затем к раствору ортованадата натрия был прилит второй водный раствор, содержащий 8.7 ммоль $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, 1.0 ммоль $Yb(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ и 0.3 ммоль $Bi(NO_3)_3 \cdot 8H_2O$ (общее количество 10.0 ммоль). Получившаяся система была перемешана на магнитной мешалке в течение 5 минут до получения желтого раствора. Раствор был помещен в 500 мл автоклав и выдержан при температуре 180 °С в течение 24 часов. После охлаждения до комнатной температуры на воздухе осадок $YVO_4:Bi^{3+}, Yb^{3+}$ на дне автоклава отделялся от раствора центрифугированием при скорости $8 \cdot 10^3$ об/мин и промывался несколько раз дистиллированной водой и этанолом. После сушки в течение 16 ч на воздухе при комнатной температуре осадок $YVO_4:Bi^{3+}, Yb^{3+}$ был измельчен в агатовой ступке. Полученный порошок был подвергнут отжигу при 900 °С в течение 2 ч в керамическом

тигле в электрической трубчатой печи при воздушной атмосфере. Нагрев с комнатной температуры до заданной проводился с постоянной скоростью 5 °С/мин. После окончания высокотемпературной обработки и охлаждения до комнатной температуры порошок вновь был измельчен в агатовой ступке.

Характеризация

Рентгеноструктурный анализ (РСА) полученных образцов был проведен с использованием рентгеновского дифрактометра FRINGE Xrd-602 (LANScientific, Китай) с излучением $CuK\alpha$ (1.5406 Å). Измерения были выполнены в диапазоне углов дифракции от 20° до 90° с шагом 0.025° и временем измерения 5 с на шаг. Морфология частиц была исследована на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) EVO 50 XVP (Carl Zeiss, Германия). ИК-Фурье-спектры были зарегистрированы на спектрометре Spectrum 400 (PerkinElmer, США) с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения. Спектры записывали в диапазоне 4000–400 cm^{-1} с разрешением 4 cm^{-1} ; образец наносили непосредственно на кристалл НПВО. Люминесцентная спектроскопия (ЛС), включая исследования спектров возбуждения и эмиссии фотолюминесценции и кривых затухания, была осуществлена с использованием модульного спектрофлуориметра Fluorolog-QM-75-22-C (Horiba, Канада). В качестве источника возбуждающего излучения была использована ксеноновая лампа мощностью 75 Вт. Регистрация спектров была осуществлена при помощи фотоумножителя Hamamatsu R13456 с многощелочным катодом. Все измерения проводились при комнатных условиях. Рентгеноструктурный анализ и люминесцентная спектроскопия выполнены с использованием оборудования Распределенного коллективного спектра-аналитического Центра изучения строения, состава и свойств веществ и материалов ФИЦ КазНЦ РАН.

Результаты и обсуждение

Рентгеноструктурный анализ и сканирующая электронная микроскопия

Порошковые дифрактограммы частиц $YVO_4:Bi^{3+}, Yb^{3+}$ до отжига (обозначены синим цветом) и после отжига при температуре 900 °С (обозначены красным цветом) представлены на рис. 1а. Данные РСА двух образцов соответствуют эталонной дифрактограмме тетрагонального кристалла YVO_4 , относящийся к пространственной группе $I4_1/amd$ (набор данных sd_0548430 SpringerMaterials [15]). На дифракционных картинах отсутствуют пики, соответствующие примесям или аллотропным фазам, что подтверждает однородность и однофазность состава частиц. Близость ионных радиусов ионов Yb^{3+} (0.086 нм), Bi^{3+} (0.096 нм) и Y^{3+} (0.089 нм), а также относительно небольшие концентрации легирования позволяют ионам Yb^{3+} и Bi^{3+} замещать ион Y^{3+} в кристалле YVO_4 без изменения решетки. Дифрактограммы образцов

нормированы на максимум дифракционного пика (200). Результаты показали, что частицы, не прошедшие температурную обработку отжигом, характеризуются низкой кристалличностью, о чем свидетельствуют широкие пики дифракции. В то

время как порошок частиц, отожженный при температуре 900 °С, демонстрирует узкие резкие пики, что указывает на улучшение кристалличности порошка $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$.

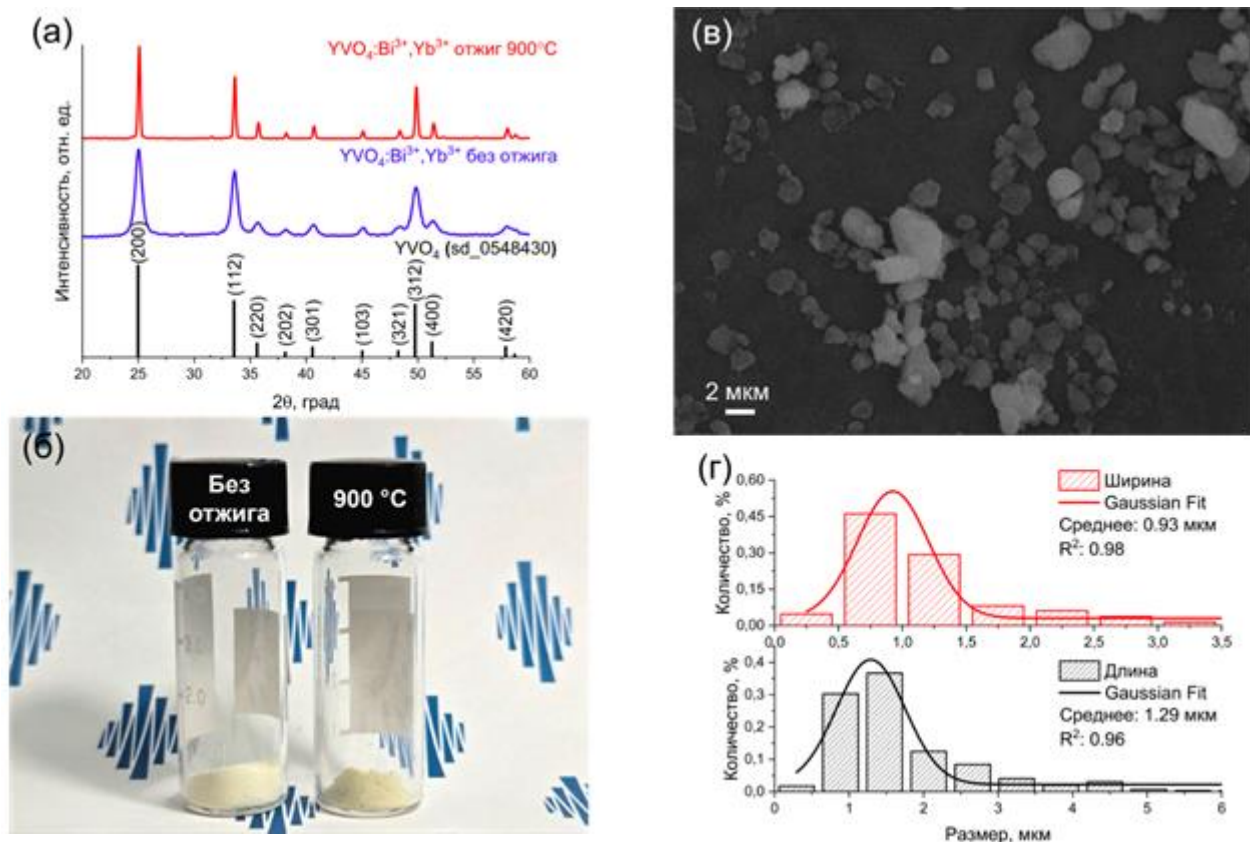


Рис. 1 – (а) порошковые дифрактограммы частиц $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ до отжига (синий цвет), после отжига при температуре 900 °С (красный цвет) и эталонная рентгенограмма YVO_4 (sd_0548430 SpringerMaterials) (черный цвет); (б) Изображение порошков частиц $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ до и после отжига; (в) СЭМ-изображение $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ до отжига; (г) Гистограммы распределения частиц по размерам: ширина (красный цвет), длина (черный цвет)

Fig. 1 – (a) Powder diffraction patterns of $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ particles before annealing (blue), after annealing at 900 °C (red), and reference X-ray diffraction pattern of YVO_4 (sd_0548430 SpringerMaterials) (black); (b) Image of $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ particle powders before and after annealing; (c) SEM image of $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ before annealing; (d) Histograms of particle size distribution: width (red), length (black)

На рис. 1б представлено изображения порошков частиц $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ до и после проведения процедуры отжига. Сравнительный анализ двух образцов демонстрирует, что температурная обработка не оказала влияния на их внешний вид.

СЭМ-изображение частиц $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ в неотожженном состоянии приведено на рис. 1в. Кристаллы имеют несимметричную форму, которая лишь отдаленно напоминает сферическую. На основании анализа выборки, включающей 300 частиц, было установлено, что средние значения их длины и ширины составляют 1.29 ± 0.05 мкм и 0.93 ± 0.03 мкм, соответственно (рис. 1г).

Инфракрасная спектроскопия

На рис. 2 представлены ИК спектры поглощения исходного и отожженного порошков частиц $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$. В спектрах обоих образцов выявлены пики при 767 см^{-1} , которые могут быть

идентифицированы как валентные колебания связи V–O, характерной для тетраэдра VO_4 . Также для обоих порошков зафиксированы линии в области 449 см^{-1} , соответствующие валентной колебательной моде Y–O [16]. Для порошка $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$, не прошедшего высокотемпературную обработку, наблюдаются широкий пик в области 3335 см^{-1} и пик при 1647 см^{-1} . Эти пики соответствуют валентным и деформационным колебаниям OH-группы, соответственно [17]. Наличие характерных линий OH-групп обусловлено присутствием воды на поверхности и в объеме частиц $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$, что является следствием использования гидротермального метода синтеза. Отжиг при температуре 900 °С приводит к удалению адсорбированных молекул H_2O , о чем свидетельствует отсутствие линий поглощения OH в спектре отожженного образца.

Люминесцентная спектроскопия

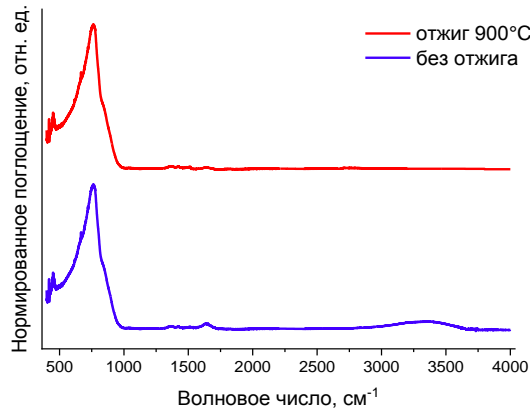


Рис. 2 – ИК спектроскопия порошков $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ до отжига (синий цвет), после отжига при температуре $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (красный цвет)

Fig. 2 – IR spectroscopy of $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ powders before annealing (blue) and after annealing at $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (red)

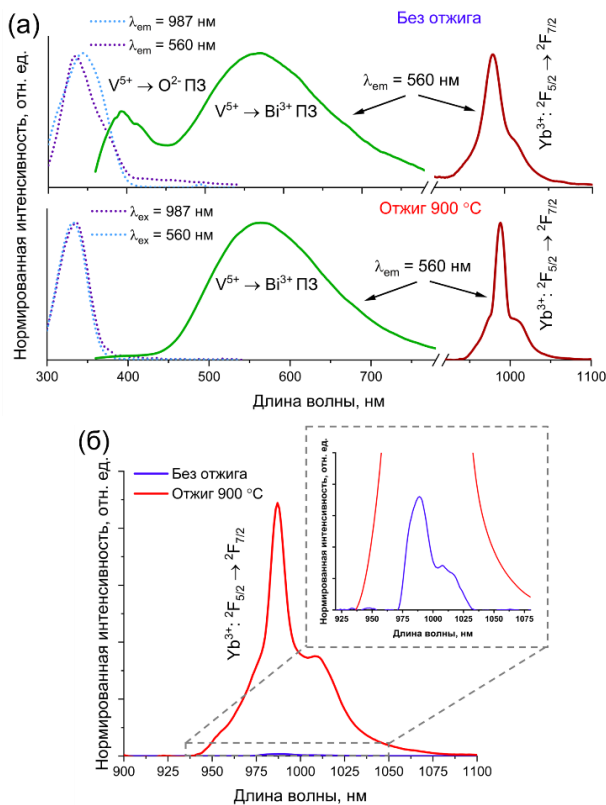


Рис. 3 – (а) Нормированные на максимум спектры возбуждения (пунктирные линии) и испускания люминесценции (непрерывные линии) частицами $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ до (сверху) и после отжига (снизу); (б) Люминесценция частиц $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ в ближнем ИК-диапазоне для отожженных и неотожженных образцов

Fig. 3 – (a) Normalized to maximum excitation (dotted lines) and luminescence emission (solid lines) spectra of $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ particles before (top) and after annealing (bottom); (b) Luminescence of $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ particles in the near-IR range for annealed and unannealed samples

На рис. 3а представлены спектры возбуждения (пунктирные линии) и спектры испускания люминесценции (непрерывные линии) для порошков $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ до и после отжига при температуре $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Спектры возбуждения записаны в диапазоне $300\text{--}540\text{ nm}$ при регистрации люминесценции на длинах волн 560 и 987 nm . Для обоих образцов характерны полосы возбуждения с максимумами в области 320 nm , которые являются результатом двух каналов возбуждения, связанных с передачей энергии через перенос заряда металл-металл $\text{Bi}^{3+} \rightarrow \text{V}^{5+}$ и перенос заряда $\text{V}^{5+} \rightarrow \text{O}^{2-}$ в VO_4^{3-} (рис. 4). Введение ионов Bi^{3+} в состав частиц оказывает сенсibiliзирующее действие на люминесценцию в ближнем ИК диапазоне. Люминесценция в видимом диапазоне для образца, не прошедшего отжиг, состоит из двух широких линий с максимумами в области 395 и 570 nm , соответствующих переходам с переносом заряда $\text{V}^{5+} \rightarrow \text{O}^{2-}$ и $\text{V}^{5+} \rightarrow \text{Bi}^{3+}$ (рис. 4). Излучение в области 570 nm связано как с прямым поглощением ультрафиолетового (УФ) излучения ионами Bi^{3+} , так и с передачей энергии возбуждения от VO_4^{3-} . Для образца, прошедшего отжиг, интенсивность полосы испускания $\text{V}^{5+} \rightarrow \text{O}^{2-}$ незначительна по отношению к интенсивности люминесценции $\text{V}^{5+} \rightarrow \text{Bi}^{3+}$. В ближнем ИК диапазоне наблюдается люминесценция с максимумом 987 nm , отвечающая переходу ${}^2\text{F}_{5/2} \rightarrow {}^2\text{F}_{7/2}$ ионов Yb^{3+} . Эта люминесценция является результатом даун-конверсии — двухквантовой передачи энергии от ионов Bi^{3+} ионам Yb^{3+} , как показано на рис. 4.

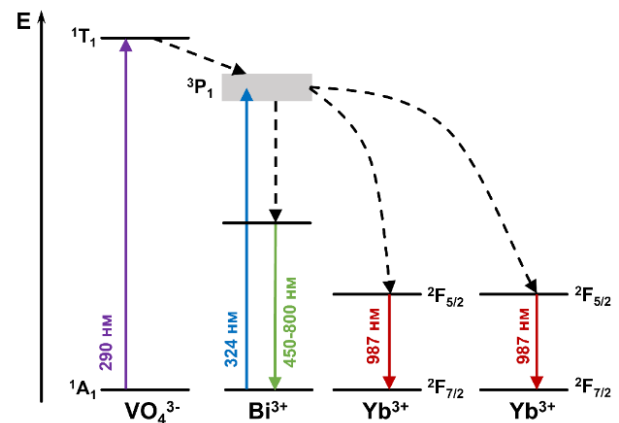


Рис. 4 – Схематическая диаграмма уровней энергии и механизмов переноса энергии в частицах $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ при возбуждении УФ-излучением

Fig. 4 – Schematic diagram of energy levels and energy transfer mechanisms in $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ particles upon excitation by UV radiation

На рис. 3б приведено отношение интенсивностей люминесценции Yb^{3+} двух образцов. Интенсивность эмиссии отожженного порошка $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ превышает интенсивность исходных неотожженных частиц более чем в 100 раз. Усиление

люминесценции $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ может быть связано с уменьшением общей концентрации дефектов кристаллической решетки и удалением высокочастотных осцилляторов OH^- с поверхности и из объема кристаллов, которые являются тушителями люминесценции. Таким образом, спектроскопические данные демонстрируют значительное усиление люминесценции в диапазоне ближнего ИК излучения, что может быть полезно для улучшения эффективности кремниевых солнечных панелей.

Закключение

В работе исследовано влияние отжига при температуре 900°C на люминесцентные свойства частиц $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$, полученных гидротермальным методом при температуре 180°C . Для установления наличия переноса энергии от матрицы YVO_4 , легированной 3% ионами Bi^{3+} , к ионам Yb^{3+} проведены измерения спектров возбуждения и эмиссии. Исходный порошок демонстрирует эмиссию в видимом диапазоне, которая связана с переносом заряда $\text{V}^{5+} \rightarrow \text{O}^{2-}$ и $\text{V}^{5+} \rightarrow \text{Bi}^{3+}$. После отжига в спектре испускания люминесценция $\text{V}^{5+} \rightarrow \text{O}^{2-}$ становится незначительной. Для обоих образцов наблюдается люминесценция в ближнем ИК диапазоне, соответствующая переходу ${}^2\text{F}_{5/2} \rightarrow {}^2\text{F}_{7/2}$ ионов Yb^{3+} . Излучение ионов Yb^{3+} является даун-конверсионным процессом, так как энергия возбуждения, передаваемая от Bi^{3+} , перераспределяется между двумя ионами Yb^{3+} . Установлено, что после отжига частицы $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ демонстрируют более чем стократное усиление люминесценции с длиной волны 987 нм. Этот эффект может быть объяснен снижением общей концентрации тушителей люминесценции, таких как дефекты кристаллической решетки и OH^- -группы. Данное предположение подтверждается данными рентгеноструктурного анализа и инфракрасной спектроскопии. Значительное усиление люминесценции в ближнем ИК диапазоне позволяет использовать частицы $\text{YVO}_4:\text{Bi}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ в комбинации с традиционными кремниевыми солнечными панелями для более эффективного преобразования солнечной энергии в электричество посредством даун-конверсии.

Исследования даун-конверсионных частиц выполнены в рамках темы государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. D. Kang, E. Jeon, S. Kim, J. Lee, *BioChip J.*, 2020. **14**, 1, 124-135 (2020). DOI: 10.1515/ntrev-2020-0079.
2. A.M. Darwish, S.S. Sarkisov, S. Wilson, J. Wilson, E. Collins, D. N. Patel, K. Cho, A. Giri, L. Kopplitz, B. Kopplitz, D. Hui, *Nanotechnol. Rev.*, **9**, 1, 1044-1058 (2020). DOI: 10.1515/ntrev-2020-0079.
3. G. Song, C. Lou, H. Diao, R. Zhu, *Sol. RRL*, **8**, 7, Article 2400026 (2024). DOI: 10.1002/solr.202400026.
4. S.M. Ferro, M. Wobben, B. Ehrler, *Mater. Horiz.*, **8**, 4, 1072-1083 (2021). DOI: 10.1039/D0MH01470B.
5. A. Mayavan, *ACS omega*, **9**, 15, 16880-16892 (2024). DOI: 10.1021/acsomega.3c08806.
6. B. Ehrler, N. Yanai, L. Nienhaus, *J. Chem. Phys.*, **154**, 7, Article 070401 (2021). DOI: 10.1063/5.0045323.
7. R.T. Wegh, H. Donker, E.V.D. Van Loef, K.D. Oskam, A. Meijerink, *J. Lumin.*, **87**, 1017-1019 (2000). DOI: 10.1016/S0022-2313(99)00514-1.
8. X. Huang, S. Han, X. Liu, *Chem. Soc. Rev.*, **42**, 1, 173-201 (2013). DOI: 10.1039/C2CS35288E.
9. R. Dallaev, T. Pisarenko, N. Papez, V. Holcman, *Mater*, **16**, 17, 5839 (2023). DOI: 10.3390/ma16175839.
10. A.S. Al-Ezzi, M.N.M. Ansari, *Appl. Syst. Innov.*, **5**, 4, Article 67 (2022). DOI: 10.3390/asi5040067.
11. T. Trupke, M. Green, P. Würfel, *J. Appl. Phys.*, **92**, 3, 1668-1674 (2002). DOI: 10.1063/1.1492021.
12. T.J. Milstein, D.M. Kroupa, D.R. Gamelin, *Nano Lett.*, **18**, 6, 3792-3799 (2018). DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b01066.
13. X. Wei, S. Huang, Y. Chen, C. Guo, M. Yin, W. Xu, *J. Appl. Phys.*, **107**, 10, Article 103107 (2010). DOI: 10.1063/1.3425794.
14. Z. Fu, S. Zhang, *J. Nanotechnol.*, **2**, 1-2, 1-24 (2010).
15. Schwarz, H., *Über die Chromate (V) der Seltenen Erden. IV Yttriumchromat (V), YCrO₄*. Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie, 1963. **322**(3- 4): p. 137-144.
16. K. William, *Organic Spectroscopy Macmillan Educational Ltd. Houldmills, Hampshire*, 1987. P. 410.
17. S.L. Priyobarta, S.N. Premananda, S.T. David, *J. Nanomed. Nanotechnol.*, **8**, 445, Article 2 (2017). DOI: 10.4172/2157-7439.1000445.

References

1. D. Kang, E. Jeon, S. Kim, J. Lee, *BioChip J.*, 2020. **14**, 1, 124-135 (2020). DOI: 10.1515/ntrev-2020-0079.
2. A.M. Darwish, S.S. Sarkisov, S. Wilson, J. Wilson, E. Collins, D. N. Patel, K. Cho, A. Giri, L. Kopplitz, B. Kopplitz, D. Hui, *Nanotechnol. Rev.*, **9**, 1, 1044-1058 (2020). DOI: 10.1515/ntrev-2020-0079.
3. G. Song, C. Lou, H. Diao, R. Zhu, *Sol. RRL*, **8**, 7, Article 2400026 (2024). DOI: 10.1002/solr.202400026.
4. S.M. Ferro, M. Wobben, B. Ehrler, *Mater. Horiz.*, **8**, 4, 1072-1083 (2021). DOI: 10.1039/D0MH01470B.
5. A. Mayavan, *ACS omega*, **9**, 15, 16880-16892 (2024). DOI: 10.1021/acsomega.3c08806.
6. B. Ehrler, N. Yanai, L. Nienhaus, *J. Chem. Phys.*, **154**, 7, Article 070401 (2021). DOI: 10.1063/5.0045323.
7. R.T. Wegh, H. Donker, E.V.D. Van Loef, K.D. Oskam, A. Meijerink, *J. Lumin.*, **87**, 1017-1019 (2000). DOI: 10.1016/S0022-2313(99)00514-1.
8. X. Huang, S. Han, X. Liu, *Chem. Soc. Rev.*, **42**, 1, 173-201 (2013). DOI: 10.1039/C2CS35288E.
9. R. Dallaev, T. Pisarenko, N. Papez, V. Holcman, *Mater*, **16**, 17, 5839 (2023). DOI: 10.3390/ma16175839.
10. A.S. Al-Ezzi, M.N.M. Ansari, *Appl. Syst. Innov.*, **5**, 4, Article 67 (2022). DOI: 10.3390/asi5040067.
11. T. Trupke, M. Green, P. Würfel, *J. Appl. Phys.*, **92**, 3, 1668-1674 (2002). DOI: 10.1063/1.1492021.
12. T.J. Milstein, D.M. Kroupa, D.R. Gamelin, *Nano Lett.*, **18**, 6, 3792-3799 (2018). DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b01066.
13. X. Wei, S. Huang, Y. Chen, C. Guo, M. Yin, W. Xu, *J. Appl. Phys.*, **107**, 10, Article 103107 (2010). DOI: 10.1063/1.3425794.
14. Z. Fu, S. Zhang, *J. Nanotechnol.*, **2**, 1-2, 1-24 (2010).
15. Schwarz, H., *Über die Chromate (V) der Seltenen Erden. IV Yttriumchromat (V), YCrO₄*. Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie, 1963. **322**(3- 4): p. 137-144.

16. K. William, *Organic Spectroscopy Macmillan Educational Ltd.* Houldmills, Hampshire, 1987. P. 410.

17. S.L. Priyobarta, S.N. Premananda, S.T. David, *J. Nanomed. Nanotechnol.*, **8**, 445, Article 2 (2017). DOI: 10.4172/2157-7439.1000445.

© **Е. О. Митюшкин** – лаборант-исследователь, аспирант, Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского (КФТИ им. Е.К. Завойского), ФИЦ Казанский научный центр РАН (КНЦ РАН), Казань, Россия, m1tyushck1n@yandex.ru; **А. Н. Солодов** – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, КФТИ им. Е.К. Завойского, ФИЦ КНЦ РАН, sanya.solodiv@live.com; **А. Г. Шмелев** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, КФТИ им. Е.К. Завойского, ФИЦ КНЦ РАН, sgartjom@gmail.com; **Р. Ф. Ликеров** – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, КФТИ им. Е.К. Завойского, ФИЦ КНЦ РАН, rodionlikerov@gmail.com; **А. В. Леонтьев** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, КФТИ им. Е.К. Завойского, ФИЦ КНЦ РАН, mailscrew@gmail.com; **Л. А. Нуртдинова** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, КФТИ им. Е.К. Завойского, ФИЦ КНЦ РАН, nurlari@yandex.ru; **Д. К. Жарков** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, КФТИ им. Е.К. Завойского, ФИЦ КНЦ РАН, dzharkov@list.ru; **Ю. Г. Галяметдинов** – доктор химических наук, главный научный сотрудник, КФТИ им. Е.К. Завойского, ФИЦ КНЦ РАН, yugal2002@mail.ru; **В. Г. Никифоров** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, КФТИ им. Е.К. Завойского, ФИЦ КНЦ РАН, vgnik@mail.ru.

© **Е. О. Mityushkin** – Research Assistant, PhD-student, Zavoisky Physical-Technical Institute (Zavoisky PTI), FRC Kazan Scientific Center (KSC) of RAS, Kazan, Russia, m1tyushck1n@yandex.ru; **A.N. Solodov** – PhD (Chemical Sci.), Senior Researcher, Zavoisky PTI, FRC KSC RAS, sanya.solodiv@live.com; **A. G. Shmelev** – PhD (Physical and Mathematical Sci.), Senior Researcher, Zavoisky PTI, FRC KSC RAS, sgartjom@gmail.com; **R. F. Likero** – PhD (Physical and Mathematical Sci.), Junior Researcher, Zavoisky PTI, FRC KSC RAS, rodionlikerov@gmail.com; **A. V. Leontiev** – PhD (Physical and Mathematical Sci.), Senior Researcher, Zavoisky PTI, FRC KSC RAS, mailscrew@gmail.com; **L. A. Nurtdinova** – PhD (Physical and Mathematical Sci.), Senior Researcher, Zavoisky PTI, FRC KSC RAS, nurlari@yandex.ru; **D.K. Zharkov** – PhD (Physical and Mathematical Sci.), Senior Researcher, Zavoisky PTI, FRC KSC RAS, dzharkov@list.ru; **Yu. G. Galyametdinov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Chief Researcher, Zavoisky PTI, FRC KSC RAS, yugal2002@mail.ru; **V. G. Nikiforov** – PhD (Physical and Mathematical Sci.), Leading Researcher, Zavoisky PTI, FRC KSC RAS, vgnik@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 10.09.25.

Дата принятия рукописи в печать – 15.09.25.