

Зависимость люминесценции комплексов $\text{NaYF}_4:\text{Yb}/\text{Tm}$ от режима и интенсивности оптической накачки при разных концентрациях активаторов и сенсibilизаторов

С.А. Буриков,^{1,*} К.А. Бузанов,¹ И.В. Пластинин,² В.И. Панов,¹
С.В. Кузнецов,³ В.Ю. Пройдакова,³ В.В. Воронов,³ Т.А. Доленко¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра квантовой электроники
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова д. 38

(Поступила в редакцию 28.11.2025; после доработки 04.12.2025; подписана в печать 08.12.2025)

В настоящей работе рассмотрено влияние концентраций ионов иттербия и тулия на зависимость интенсивности люминесценции наночастиц $\text{NaYF}_4:\text{Yb}/\text{Tm}$ от режима и интенсивности оптической накачки. Проанализированы два режима возбуждения люминесценции: непрерывный и импульсный. Установлено, что изменение концентраций иттербия и тулия не приводит к изменению хода кривой зависимости интенсивности люминесценции наночастиц от интенсивности оптической накачки как при импульсном, так и при непрерывном возбуждении.

PACS: 33.50.Dq, 42.62.Fi, 78.55.-m УДК: 539.2, 538.9

Ключевые слова: редкоземельные ионы, апконверсионная люминесценция, лазерная спектроскопия, безызлучательный перенос энергии.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.81.2610403](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.81.2610403)

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наночастицы на основе ионов редкоземельных элементов (РЗЭ) привлекают внимание благодаря возможности реализации для них режима апконверсионной (антистоксовой) люминесценции при инфракрасном возбуждении [1]. Это открывает широкие перспективы для применения таких материалов в самых различных областях: в технологиях защищенной печати [2], термометрии [3, 4], в качестве люминесцентных маркеров в биологии и медицине [5].

Как правило, наночастицы состоят из инертной кристаллической матрицы, легированной ионами двух типов. Ион-сенсibilизатор обладает высоким сечением поглощения, он способен эффективно поглощать возбуждающее излучение ближнего ИК-диапазона и безызлучательно передавать его на ион активатор, который и является источником апконверсионной люминесценции. При выборе материала матрицы необходимо принимать во внимание энергию фононов матрицы, расстояние между ионами РЗЭ и их расположение в кристаллической решетке. Для оптимального встраивания сенсibilизаторов и активаторов в узлы матричной решетки заряд и размер ионов кристаллической

матрицы не должны сильно отличаться от заряда и размера ионов примеси. Для уменьшения потерь энергии на тепловые колебания решетки необходимо использовать матрицы с низкой энергией фононов. В качестве матриц для легирования ионами РЗЭ используют преимущественно фториды, оксиды и оксофториды [6, 7]. Чаще всего используются матрицы на основе гексагональных модификаций NaGdF_4 [8] и NaYF_4 [9]. В роли сенсibilизаторов выступают, как правило, ионы иттербия, а в роли активаторов — ионы эрбия или тулия [10, 11].

В связи с тем, что в формирование апконверсионной люминесценции вовлечено несколько сложных процессов, происходящих при миграции энергии между ионами и релаксации возбужденных состояний по различным каналам, зависимость интенсивности люминесценции от интенсивности возбуждающего излучения имеет сложный нелинейный характер [12, 13]. В области малых значений интенсивности накачки зависимость интенсивности люминесценции комплексов от мощности накачки P описывается функцией P^n , где n — число поглощенных фотонов накачки, необходимых для возникновения апконверсионной люминесценции с данного энергетического уровня. При увеличении интенсивности накачки зависимость стремится к P^1 [14], а при дальнейшем увеличении интенсивности накачки возможно даже достижение насыщения люминесценции [15, 16]. Исследование зависимостей интенсивности люминесценции РЗЭ от

* E-mail: sergey.burikov@gmail.com

интенсивности накачки является одним из эффективных инструментов исследования процессов, протекающих в различных матрицах при оптическом возбуждении.

Еще одним важным фактором, определяющим формирование люминесцентного отклика наночастиц с РЗЭ, является концентрация сенсibilизаторов и активаторов. Увеличение концентрации ионов сенсibilизаторов увеличивает сечение поглощения и позволяет, с одной стороны, значительно увеличить интегральную интенсивность люминесценции [17], а с другой стороны, это увеличивает вероятность концентрационного тушения люминесценции [18]. Увеличение концентрации активаторов, с одной стороны, приводит к увеличению числа люминесцирующих центров, с другой стороны — приводит к уменьшению расстояния между ними, что увеличивает вероятность кросс-релаксации, приводящей к тушению люминесценции [19]. Таким образом, интенсивность возбуждающего излучения и концентрации ионов активаторов и сенсibilизаторов являются ключевыми параметрами, определяющими люминесцентные свойства люминофоров с ионами РЗЭ.

Надо отметить, что на данный момент есть достаточно много работ, в которых исследовались зависимости интенсивности различных полос люминесценции порошков наночастиц с РЗЭ от интенсивности накачки (в основном при непрерывном возбуждении) [12–18] или в которых исследовалось влияние концентрации активаторов или сенсibilизаторов на интенсивность люминесценции наночастиц [19–23]. Имеется не так много работ, в которых исследовались зависимости интенсивности люминесценции от интенсивности непрерывной накачки для порошков наночастиц с разными концентрациями активаторов и сенсibilизаторов [16, 24]. В работе [16] показано, что изменение соотношения концентраций иттербия и тулия не влияет на форму кривой зависимости интенсивности люминесценции от интенсивности накачки в диапазоне 1 кВт/см^2 – 10 МВт/см^2 при непрерывном возбуждении, но смещает эту кривую по оси интенсивности накачки. Авторами [24] установлено, что при достаточно больших концентрациях иттербия (до 60%) и концентрации тулия 4–8% при непрерывном возбуждении люминесценции ход кривой зависимости интенсивности люминесценции наночастиц от интенсивности накачки в диапазоне 5 кВт/см^2 – 10 МВт/см^2 не меняется качественно, при этом сама интенсивность люминесценции растет при увеличении концентрации и активаторов, и сенсibilизаторов. Кроме того, изменение концентрации сенсibilизаторов также приводит к смещению кривой по оси интенсивности накачки.

Особый интерес представляют как раз участки кривой при малых интенсивностях накачки (единицы/десятки Вт/см^2), когда кривая заведомо нелинейна, и при максимально высоких интенсивностях (сотни МВт/см^2), когда уже может иметь место режим насыщения люминесценции даже для наноча-

стиц РЗЭ в суспензиях. Поэтому в настоящей работе был сделан акцент на исследовании люминесценции суспензий наночастиц $\text{NaYF}_4:\text{Yb}/\text{Tm}$ именно в этих диапазонах изменения интенсивности накачки.

Еще одним принципиальным моментом является выбор режима возбуждения люминесценции — непрерывный или импульсный. Для наночастиц с РЗЭ, где имеет место не прямое возбуждение люминесценции за счет безызлучательного переноса энергии, это особенно важно, так как пиковая мощность, длительность импульсов и частота их следования могут существенно менять картину формирования люминесцентного отклика наночастиц. В случае использования импульсного зондирования, как правило, основное внимание уделяется исследованию профилей кинетических кривых затухания люминесценции [21, 25, 26]. Вопрос интенсивности импульсов оптической накачки обычно не рассматривается. При этом режим возбуждения сигнала с помощью коротких мощных импульсов особенно интересен, так как в этом случае есть возможность максимально близко приблизиться к порогу насыщения люминесценции.

Случай возбуждения сигнала люминесценции с помощью коротких мощных лазерных импульсов исследован в единичных работах [4, 27, 28]. В публикации [4] для построения сенсора температуры на основе наночастиц РЗЭ использовано то обстоятельство, что при высоких мощностях импульсной накачки соотношение интенсивностей полос люминесценции с термически связанных уровней не зависит от интенсивности возбуждения. Авторами [27] исследован ход зависимостей отношения интенсивностей полос люминесценции комплексов $\text{NaYF}_4:\text{Yb}/\text{Tm}$ в районе 450 нм и 475 нм от мощности импульсной накачки при разных концентрациях активаторов и сенсibilизаторов. В работе [28] исследован ход зависимостей интенсивности люминесценции наночастиц РЗЭ от интенсивности импульсной накачки в диапазоне от 20 до 100 МВт/см^2 .

В данной статье были исследованы зависимости интенсивности наиболее интенсивной полосы спектра люминесценции в районе 800 нм люминофоров $\beta\text{-NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ с разной концентрацией активаторов и сенсibilизаторов в растворе диметилсульфоксида (ДМСО) от интенсивности и режима оптической накачки. В работе были рассмотрены два режима возбуждения люминесценции: непрерывным лазерным излучением и мощными наносекундными импульсами. Исследования проводились при изменении интенсивности накачки в диапазонах $0\text{--}1400 \text{ Вт/см}^2$ (непрерывный режим) и $5\text{--}360 \text{ МВт/см}^2$ (импульсный режим).

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Синтез и характеристика образцов

В качестве объектов исследования использовались суспензии нанолуминофоров $\beta\text{-NaYF}_4\text{:Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ в ДМСО. Методика синтеза образцов подробно описана в [29]. Были синтезированы две серии образцов $\beta\text{-NaYF}_4\text{:Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ таким образом, что в одной из серий варьировалась концентрация сенсibilизатора (серия 1) при постоянной концентрации активатора, а в другой (серия 2) варьировалась концентрация активатора при постоянной концентрации сенсibilизатора (таблица). Концентрация всех образцов в суспензиях составляла 1 г/л.

Таблица. Концентрации ионов сенсibilизаторов и активаторов в комплексах

| Номер образца (Серия) | Концентрация Yb, мол% | Концентрация Tm, мол% |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 (серия 1) | 10 | 4 |
| 2 (серия 1) | 14 | 4 |
| 3* (серия 1) | 18 | 4 |
| 4 (серия 1) | 22 | 4 |
| 5 (серия 2) | 18 | 1 |
| 6 (серия 2) | 18 | 2 |
| 7* (серия 2) | 18 | 4 |
| 8 (серия 2) | 18 | 6 |

*Образцы 3 и 7 — это один и тот же образец.

Элементный состав образцов синтезированных частиц $\beta\text{-NaYF}_4\text{:Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ контролировался посредством рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре Genius IF (Xenometrix). В спектре рентгеновской флуоресценции выявлены полосы иттербия (в районе 7417, 8402, 8759 эВ) и тулия (в районе 7180 эВ), что подтверждает их наличие в наночастицах.

Морфология и размер частиц были определены на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2100. Размер частиц составил около 20 нм. Размеры агрегатов в суспензиях ДМСО по данным динамического светорассеяния (Malvern Zetasizer Nano ZS) составили в среднем около 34 нм, что свидетельствует об отсутствии значительной агрегации наночастиц в суспензиях при сопоставлении с результатами просвечивающей электронной микроскопии (рис. 1).

На рис. 2 представлены некоторые из полученных спектров комбинационного рассеяния (КР) высушенных на кремниевой подложке образцов. Исследованные образцы имели гексагональную кристаллическую фазу, что подтверждается наличием трех характерных пиков в районе $250\text{--}350\text{ см}^{-1}$ в спектрах КР [30]. Спектры КР были зарегистрированы с помощью конфокального рамановского микроскопа (производство «Активная фотоника»,

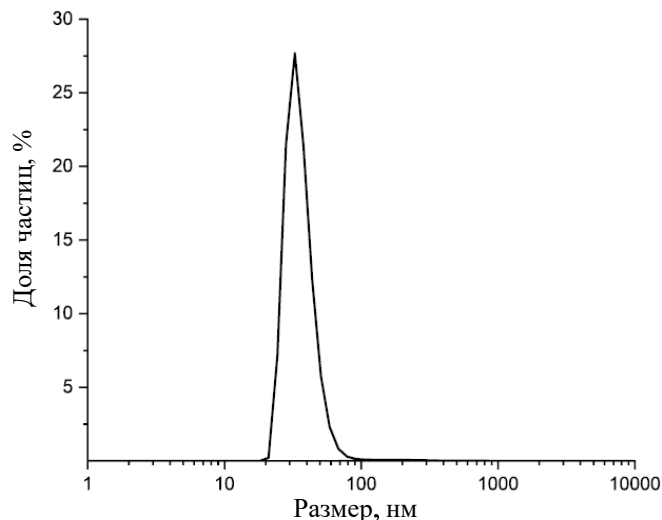


Рис. 1. Распределение частиц по размеру для образца $\text{NaYF}_4\text{:Yb}^{3+}$ (14 мол%)/ Tm^{3+} (4 мол%)

модель LS Rambo 620, Россия).

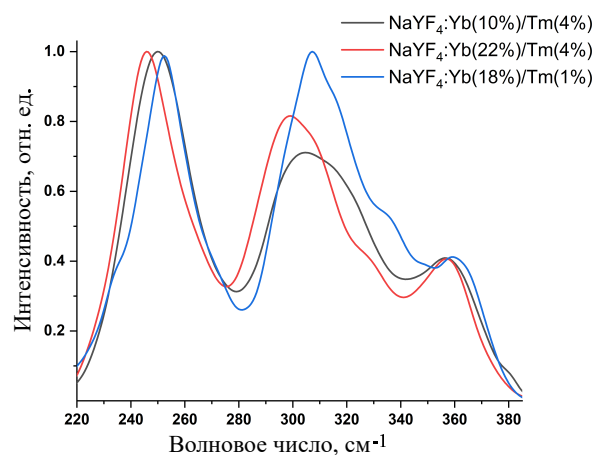


Рис. 2. Типичные спектры КР высушенных образцов частиц $\beta\text{-NaYF}_4\text{:Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$

2.2. Люминесцентная спектроскопия частиц $\beta\text{-NaYF}_4\text{:Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ в ДМСО

В эксперименте использовались два режима возбуждения люминесценции: непрерывный и импульсный.

Для реализации непрерывного режима использовался диодный лазер с длиной волны 980 нм с максимальной мощностью лазера 700 мВт в кювете с образцом. Ширина пучка в кювете составляла 250 мкм (максимальная плотность мощности 1.4 кВт/см^2). Для регистрации сигнала использовалась система высокоскоростного анализа кинетики затухания люминесценции веществ (на базе спектрофлуориметра OmniFluo-900, производство Zolix

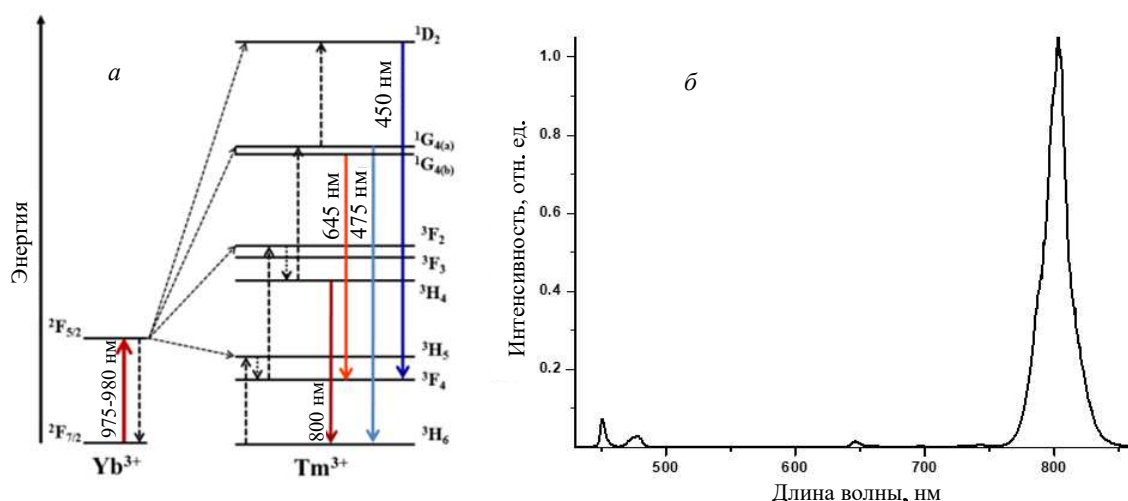


Рис. 3. *a* — Схема передачи энергии возбуждения и возникновения апконверсионной люминесценции в комплексах β -NaYF₄:Yb³⁺/Tm³⁺. *б* — Спектр люминесценции образца NaYF₄:Yb³⁺/Tm³⁺ (18 мол.% Yb, 1 мол.% Tm) в ДМСО

Instruments). Система регистрации включала в себя монохроматор (фокусное расстояние 320 мм, решетка 1200 штр/мм) и ФЭУ (Hamamatsu R13456), работающий в режиме счета фотонов.

Для импульсного возбуждения антистоксовой люминесценции частиц использовался Nd:YAG лазер модели LQ629-100 с параметрическим генератором света LP603 (Solar, Белоруссия) с длиной волны излучения 975 нм. Максимальная мощность лазера на длине волны 975 нм достигала 200 мВт при длительности импульса 10 нс и частоте повторения 100 Гц. Пиковая плотность мощности накачки при диаметре лазерного пучка 250 мкм составляла около 360 МВт/см². Система регистрации состояла из монохроматора Acton 2500i (фокусное расстояние 500 мм, дифракционная решетка 900 штр/мм) и CCD-камеры (Horiba Jobin Yvon, модель Sincerity).

Плавное изменение интенсивности лазерного излучения осуществлялось поворотом призмы Глана. Для подавления сигнала упругого рассеяния использовался блокирующий интерференционный фильтр. Зондирование образцов осуществлялось в 90-градусной геометрии эксперимента в стандартной кварцевой кювете (10×10×50 мм³). Измерения проводились при комнатной температуре 20°C.

На рис. 3, *a* приведена схема передачи энергии возбуждения и возникновения апконверсионной люминесценции в частицах β -NaYF₄:Yb³⁺/Tm³⁺. На рис. 3, *б* представлен типичный спектр люминесценции суспензий нанолуминофоров NaYF₄:Yb³⁺/Tm³⁺ в ДМСО.

В спектре присутствует целый набор полос люминесценции тулия, в частности полосы в районе 800 нм (переход $^3H_4 > ^3H_6$), 645 нм ($^1G_{4(b)} > ^3F_4$), 475 нм ($^1G_{4(a)} > ^3H_6$) и 450 нм ($^1D_2 > ^3F_4$). Полоса в районе 800 нм наиболее интересна, так как она наиболее интенсивная и находится в «окне прозрачности» биологических тканей.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе исследовались зависимости интенсивности люминесценции полосы в районе 800 нм обеих серий нанолуминофоров NaYF₄:Yb/Tm от интенсивности оптической накачки при непрерывном и импульсном зондировании.

3.1. Непрерывное возбуждение люминесценции

На рис. 4 представлены зависимости интенсивности полосы в районе 800 нм от интенсивности накачки для образцов серии 1 при непрерывном возбуждении. Так как основной целью работы было выявить различия в ходе кривых, для удобства восприятия все кривые были нормированы на максимальное значение (рис. 4, *б*).

Как можно заметить (рис. 4, *a*), интенсивность люминесценции полосы в районе 800 нм увеличивается с ростом концентрации иттербия. Это находится в соответствии с результатами, полученными в работе [19]. При этом качественно ход кривой не меняется для всех образцов с разной концентрацией сенсibilизатора (рис. 4, *б*). Это можно объяснить следующим образом. Увеличение концентрации сенсibilизаторов приводит к более эффективному поглощению накачки, поэтому интенсивность люминесценции растет. При этом концентрации сенсibilизаторов не настолько велики (меньше 22%), чтобы свою роль начали играть концентрационное тушение люминесценции и обратный перенос энергии [31]. Поэтому ход кривой остается неизменным.

Аналогичные кривые для серии 2 образцов представлены на рис. 5.

Можно было бы ожидать, что интенсивность люминесценции полосы в районе 800 нм будет расти

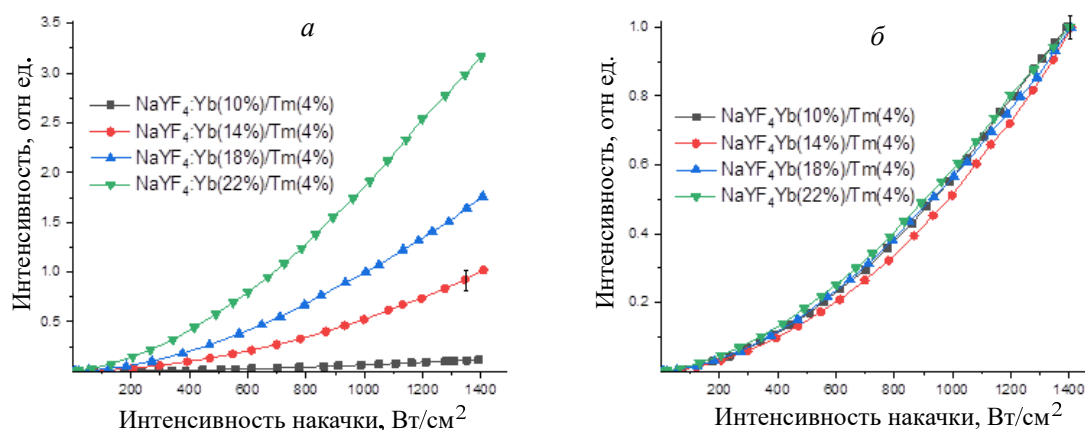


Рис. 4. Зависимости интенсивности полосы в районе 800 нм от интенсивности накачки для образцов серии 1 при непрерывном возбуждении: *a* — исходные зависимости, *б* — нормированные на максимальную интенсивность полосы

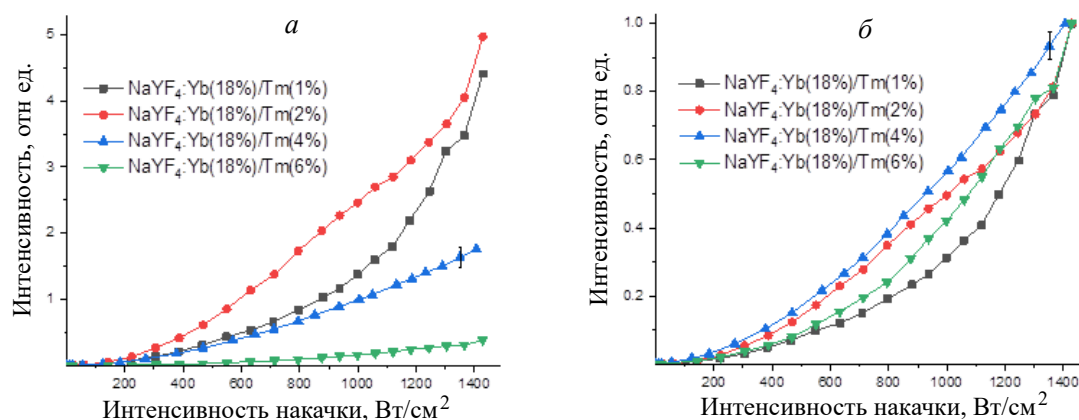


Рис. 5. Зависимости интенсивности полосы в районе 800 нм от интенсивности накачки для образцов серии 2 при непрерывном возбуждении: *a* — исходные зависимости, *б* — нормированные на максимальную интенсивность полосы

с увеличением концентрации тулия, но, как видно из рис. 5, *a*, наиболее интенсивная люминесценция у образца с концентрацией тулия 2%, наименее — у образца с концентрацией тулия 6%. По-видимому, причина здесь в том, что при больших концентрациях тулия возрастает роль кросс-релаксации, которая приводит к тушению люминесценции. В результате имеет место конкуренция процессов: с одной стороны, увеличение концентрации тулия приводит к росту числа люминесцирующих центров, с другой стороны, с ростом концентрации тулия увеличивается вероятность кросс-релаксации, что приводит к тушению люминесценции. Поэтому существует определенная оптимальная концентрация тулия, при которой интенсивность люминесценции максимальна [19]. По этой же причине зависимости для образца с концентрацией тулия 2% идут выше других при всех интенсивностях накачки (рис. 5, *a*).

Ход зависимостей, нормированных на максимальную интенсивность полосы и представленных на рис. 5, *б*, свидетельствует о том, что имеет место ряд протекающих одновременно процессов — безызлучательный перенос энергии с сенсibilизаторов на активаторы, обратный перенос энергии, миграция возбуждений по сенсibilизаторам и кросс-релаксация. Всё вместе это дает некую сложную систему, в которой нелинейный характер зависимостей отличается друг от друга, в результате какую-то закономерность выявить не удается.

3.2. Импульсное возбуждение люминесценции

На рис. 6 представлены зависимости интенсивности полосы в районе 800 нм от интенсивности накачки для образцов серии 1 при импульсном возбуждении люминесценции.

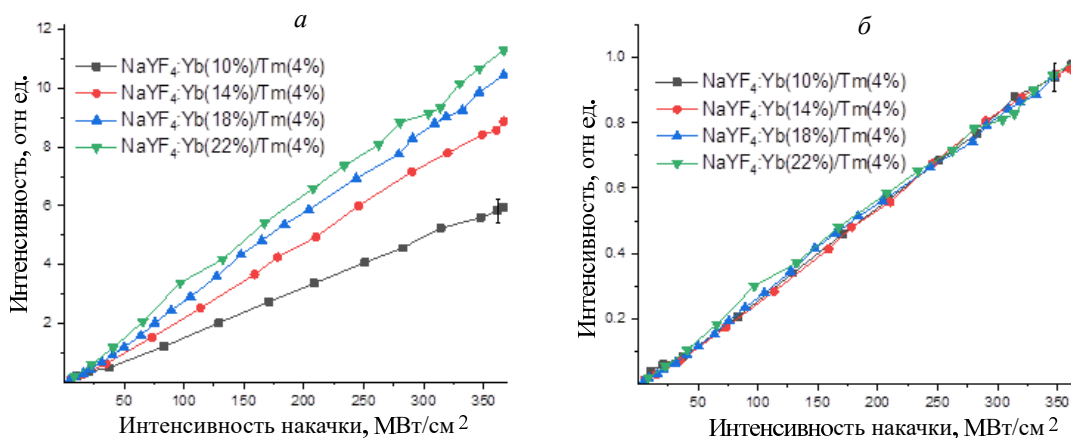


Рис. 6. Зависимости интенсивности полосы в районе 800 нм от интенсивности накачки для образцов серии 1 при импульсном возбуждении люминесценции: *a* — исходные зависимости, *б* — нормированные на максимальную интенсивность полосы

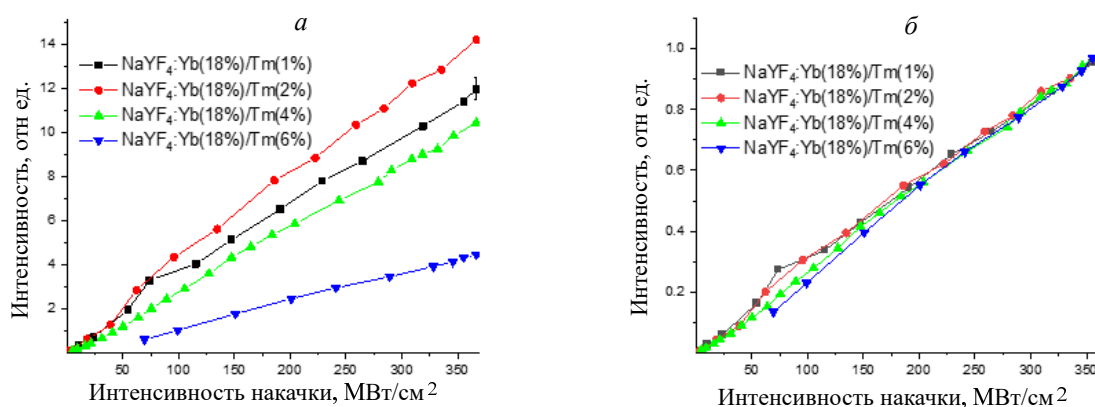


Рис. 7. Зависимости интенсивности полосы в районе 800 нм от интенсивности накачки для образцов серии 2 при импульсном возбуждении люминесценции: *a* — исходные зависимости, *б* — нормированные на максимальную интенсивность

По сравнению с непрерывным зондированием качественно картина не изменилась: увеличение концентрации сенсibilизаторов увеличивает интенсивность люминесценции, но ход зависимости не меняется. Это значит, что даже при высоких мощностях накачки (десятки и даже сотни MW/cm^2) роль концентрационного тушения люминесценции и обратного переноса энергии невелика, по крайней мере, для небольших концентраций иттербия (до 22%). При этом надо отметить, что при такой высокой интенсивности накачки зависимости линейные.

На рис. 7 представлены зависимости интенсивности полосы в районе 800 нм от интенсивности накачки для образцов серии 2 при импульсном возбуждении люминесценции.

Как можно заметить, при переходе к зондированию интенсивными лазерными импульсами карти-

на для образцов серии 2 принципиально не меняется: наиболее интенсивная люминесценция наблюдается для образца с концентрацией тулия 2%, наименее интенсивная — для образца с концентрацией тулия 6% (рис. 7, *a*). При этом сами зависимости интенсивности люминесценции полосы от интенсивности накачки (рис. 7, *б*) для всех образцов линейные, что говорит о том, что при таких интенсивностях накачки влияние кросс-релаксации на форму кривой зависимости интенсивности люминесценции от интенсивности накачки для полосы в районе 800 нм частиц $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ отсутствует.

ВЫВОДЫ

В результате экспериментов по исследованию зависимостей интенсивности люминесценции полосы в районе 800 нм частиц $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ с варьи-

руемыми концентрациями активатора и сенсibilизатора от интенсивности и режима накачки установлено следующее:

1. В случае зондирования мощными наносекундными лазерными импульсами (при интенсивности накачки 5-360 МВт/см²) для всех исследованных концентраций и активаторов, и сенсibilизаторов имеет место линейная зависимость интенсивности люминесценции указанной полосы от интенсивности накачки.
2. Для случая достаточно малых интенсивностей накачки (0-1400 Вт/см²) при непрерывном зондировании исследованные зависимости нелинейные.
3. Изменение концентрации как активаторов, так и сенсibilизаторов качественно не влияет на ход кривых зависимостей интенсивности люминесценции полосы в районе 800 нм частиц NaYF₄:Yb³⁺/Tm³⁺ от интенсивности накачки как непрерывной, так и импульсной.

Как было показано в [27], в зависимостях соотношения интенсивностей люминесценции полос в районе 450 нм и 475 нм частиц NaYF₄:Yb³⁺/Tm³⁺ от интенсивности импульсной накачки влияние разных концентраций активатора и сенсibilизатора

проявляется. По-видимому, это связано с тем, что для получения сигнала люминесценции в районе 800 нм требуется задействовать всего 2 фотона накачки, в то время как формирование полос в районе 475 нм и 450 нм требует соответственно 3 и 4 фотонов накачки. Как следствие, полоса в районе 800 нм менее чувствительна к процессам переноса энергии и дезактивации возбужденных состояний, протекающим в частицах NaYF₄:Yb³⁺/Tm³⁺.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-00411, <https://rscf.ru/project/25-22-00411/>.

Часть экспериментальных результатов, использованных в настоящей работе, получена с помощью системы высокоскоростного анализа кинетики затухания люминесценции веществ, закупленной по Программе развития МГУ (Соглашение № 231 от 20.02.2023); рентгенофлуоресцентного спектрометра, закупленного по Программе развития МГУ (Соглашение № 313 от 16.06.2023); рамановского конфокального микроскопа, закупленного в рамках федерального проекта «Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров» национального проекта «Наука и университеты» (Соглашение № 373 от 04.04.2024).

- [1] Auzel F. // *Chemical Reviews*. **104**, N 1. 139 (2004).
- [2] Kumar K., Mishra N.K., Shwetabh K. Upconverting Nanoparticles: From Fundamentals to Applications. Chapter 11. UCNPs in Solar, Forensic, Security Ink, and Anti-counterfeiting Applications, 2022.
- [3] Sarmanova O.E., Burikov S.A., Laptinskiy K.A. et al. // *Spectrochim. Acta, Part A*. **241**, 118627 (2020).
- [4] Burikov S.A., Sarmanova O.E., Fedyanina A.A. et al. // *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. **334**, 125902 (2025).
- [5] Rezende T.K.L. et al. // *Front. Chem.* **10**, 125902 (2022).
- [6] Fedorov P.P., Luginina A.A., Kuznetsov S.V., Osiko V.V. // *J. Fluorine Chem.* **132**, N 12. 1012 (2011).
- [7] Haase M., Schafer H. // *Angewandte Chemie International Edition* **50**, N 26. 5808 (2011).
- [8] Kormshikov I.D., Voronov V.V., Burikov S.A. et al. // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. **12**, N 2. 218 (2021). DOI: 10.17586/2220-8054-2021-12-2-218-223
- [9] Pilch A., Wawrzynczyk D., Kurnatowska M. et al. // *J. Lumin.* **182**, 114 (2017).
- [10] Hu Y., Sun Y., Li Y. et al. // *RSC Adv.* **4**, N 82. 43653 (2014).
- [11] Blackburn O.A., Tropiano M., Sorensen T.J., Thom J. et al. // *RSC Adv.* **14**, N 38. 13378 (2012).
- [12] Буриков С.В., Филиппова Е.А., Федянина А.А. и др. // *Оптика и Спектроскопия*. **130**, N 6. 817 (2022).
- [13] Pollnau M., Gamelin D.R., Luthi S.R., Gudel H.U. // *Physical Review B*. **61**, N 5. 3337 (2000).
- [14] Suyver J.F., Aebischer A., Garcia-Revilla S. et al. // *Physical Review B*. **71**, 125123 (2005).
- [15] Zhou J., Chen G., Zhu Y., Huo L. // *Journal of Materials Chemistry C*. **3**, N 2. 364 (2015).
- [16] De Camillis S. et al. // *Nanoscale*. **12**, N 39. 20347 (2020).
- [17] Reig D.S., Grauel B. et al. // *J. Mater. Chem. C*. **8**, N 12. 4093 (2020).
- [18] Liu H., Xu C.T. et al. // *Nanoscale*. **5**, N 11. 4770 (2013).
- [19] Kuznetsov S.V., Burikov S.A., Fedyanina A.A. et al. // *Nanoscale*. **13**, N 3. 331 (2022).
- [20] Wang Z., Meijerink A. // *J. Phys. Chem. C*. **122**, N 45. 26298 (2018).
- [21] Burikov S., Filippova E., Proydakova V. et al. // *Photonics*. **11**, N 3. 228 (2024).
- [22] Pilch A., Wawrzynczyk D., Kurnatowska M. et al. // *J. Lumin.* **182**, 114 (2017).
- [23] Wei W., Zhang Y. // *Chem. Mater.* **26**, N 18. 5183 (2014).
- [24] Ma C., Shan C., Park K. et al. // *Nanophotonics*. **9**, N 7. 1993 (2020).
- [25] Kong J., Shang X., Zheng W. et al. // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. **11**, N 9. 3672 (2020).
- [26] Alyatkin S., Asharchuk I., Khaydukov K. et al. // *Nanotechnology*. **28**, N 3. 035401 (2016).
- [27] Burikov S.A., Fedyanina A.A., Filippova E.A. et al. // *Applied Optics*. **64**, N 33. 9940 (2025).
- [28] Burikov S.A., Fedyanina A.A., Laptinskiy K.A., Dolenko T.A. // *Optics Letters*. **47**, N 12. 3043 (2022).
- [29] Pominova D., Proydakova V., Romanishkin I. et al. // *Nanomaterials*. **10**, N 10. 1992 (2020).
- [30] Tuyen V.T. et al. // *RSC Adv.* **13**, 19317 (2023).
- [31] Lei L., Chen D., Zhu W., Xu J., Wang Y. // *Chem. Asian J.* **9**, N 10. 2765 (2014).

Dependence of Luminescence of NaYF₄:Yb/Tm Complexes on Mode and Intensity of Optical Pumping at Different Concentrations of Activators and Sensitisers

S.A. Burikov^{1,a}, K.A. Buzanov¹, I.V. Plastinin², V.I. Panov¹, S.V. Kuznetsov³,
V.Yu. Proydakova³, V.V. Voronov³, T.A. Dolenko¹

¹*Department of Quantum Electronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov State University
Moscow 119991, Russia*

³*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^a sergey.burikov@gmail.com

In this study, the effect of the concentrations of ytterbium and thulium ions on the dependence of the intensity of luminescence of NaYF₄:Yb/Tm nanoparticles on the optical excitation mode and intensity. Two modes of luminescence excitation are analyzed: continuous and pulsed. It has been found that changes in the concentrations of ytterbium and thulium do not change the course of the curve of dependence of the intensity of luminescence of nanoparticles on the intensity of optical excitation under both pulsed and continuous excitation.

PACS: 33.50.Dq, 42.62.Fi, 78.55.-m.

Keywords: rare earth ions, upconversion luminescence, laser spectroscopy, nonradiative energy transfer.

Received 28 November 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2026. **81**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

1. Буриков Сергей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: sergey.burikov@gmail.com.
2. Бузанов Кирилл Александрович — студент; e-mail: kirillb270603@gmail.com.
3. Пластинин Иван Владимирович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; e-mail: plastinin.ivan@physics.msu.ru.
4. Панов Владимир Иванович — доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой; e-mail: panov@spmlab.phys.msu.ru.
5. Кузнецов Сергей Викторович — e-mail: kouznetzovsv@gmail.com.
6. Пройдакова Вера Юрьевна — e-mail: vera.proydakova@gmail.com.
7. Воронов Валерий Венеминович — e-mail: voronov@lst.gpi.ru.
8. Доленко Татьяна Альдефонсовна — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: tdolenko@mail.ru.