

В диссертационный совет 24.2.340.01
при Нижегородском государственном
университете им. Н.И. Лобачевского

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Гущина Сергея Вячеславовича

«Характеристики ап-конверсионной

люминесценции твердых растворов $\text{MF}_2\text{-RF}_3$

$(\text{M}^{2+} - \text{Ca}^{2+}, \text{Sr}^{2+}; \text{R}^{3+} - \text{Er}^{3+}, \text{Ho}^{3+})$ »,

представленную на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Актуальность работы

Вопросы преобразования инфракрасного (ИК) лазерного излучения в излучение видимого диапазона спектра занимают важное место в современных исследованиях. К ним относится исследование процессов ап-конверсионной люминесценции в видимом диапазоне спектра в материалах, легированных редкоземельными ионами, при их возбуждении лазерным излучением ИК области спектра. Значительный интерес при исследовании процессов ап-конверсионного преобразования ИК излучения в люминесценцию видимого диапазона спектра представляют фторидные твердые растворы со структурой флюорита $\text{MF}_2\text{-RF}_3$ ($\text{M}^{2+} - \text{Ca}^{2+}, \text{Sr}^{2+}; \text{R}^{3+} - \text{Er}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$). Этот интерес обусловлен их следующими характеристиками: низкими значениями энергии фононов ($\text{CaF}_2 - 322 \text{ см}^{-1}$, $\text{SrF}_2 - 286 \text{ см}^{-1}$) по сравнению с оксидными матрицами ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} - 850 \text{ см}^{-1}$), высокой прозрачностью в широком спектральном диапазоне (0.13-10 мкм) и склонностью ионов легирующей примеси к кластеризации. Благодаря данным свойствам, фторидные твердые растворы $\text{MF}_2\text{-RF}_3$ ($\text{M}^{2+} - \text{Ca}^{2+}, \text{Sr}^{2+}; \text{R}^{3+} - \text{Er}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$) являются перспективными материалами для исследования процессов ап-конверсионного преобразования для их последующего использования в качестве визуализаторов

лазерного ИК излучения, антифальсификационных системах и в биомедицине для визуализации.

В связи с этим, диссертационная работа Гущина С.В., посвященная исследованию характеристик ап-конверсионной люминесценции твердых растворов $\text{MF}_2\text{-RF}_3$ (M^{2+} - Ca^{2+} , Sr^{2+} ; R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+}) является актуальной, а её результаты могут быть использованы для решения прикладных задач.

Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

1. Впервые для монокристаллов и нанопорошков $(1-x)\text{SrF}_2\text{-xErF}_3$ ($x = 1.5\text{-}15.0$ мол.%) предложены процессы заселения и разгрузки энергетических уровней $^4\text{G}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^2\text{H}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{7/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ионов Er^{3+} , приводящие к возникновению ап-конверсионной люминесценции в видимой области спектра при возбуждении уровней $^4\text{I}_{11/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+} .

2. Впервые определены количественные характеристики (энергетический выход, координаты цветности) ап-конверсионной люминесценции в видимой области спектра при возбуждении уровней $^4\text{I}_{11/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+} в нанопорошках $(1-x)\text{SrF}_2\text{-xErF}_3$ ($x = 1.5\text{-}15.0$ мол.%) и выполнен их сравнительный анализ с аналогичными характеристиками монокристаллов тех же составов.

3. Впервые определены количественные характеристики (энергетический выход, координаты цветности) ап-конверсионной люминесценции в видимой области спектра при возбуждении уровня $^5\text{I}_7$ ионов Ho^{3+} в нанопорошках $(1-x)\text{SrF}_2\text{-xHoF}_3$ ($x = 1.0\text{-}11.0$ мол.%).

4. Впервые исследовано влияние солегирования ионами Yb^{3+} нанопорошков $(1-x-y)\text{SrF}_2\text{-xRF}_3\text{-yYbF}_3$ (R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+}) на эффективность ап-конверсионной люминесценции при их возбуждении ИК излучением с длинами волн 1.5 мкм и 2.0 мкм.

Значимость для науки и производства полученных автором диссертации результатов.

Гущиным С.В. получены результаты, которые являются значимыми для фундаментального и практического использования. Фундаментальная значимость заключается в получении данных о процессах ап-конверсионной люминесценции, ответственных за преобразование ИК лазерного излучения в монокристаллах и нанопорошках фторидных твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ при возбуждении уровней $^4\text{I}_{11/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+} . Эти данные позволяют лучше понять процессы передачи энергии в таких системах. Также важным результатом является то, что солегирирование ионами Yb^{3+} нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ и $\text{SrF}_2\text{-HoF}_3$ не приводит к уменьшению их энергетической эффективности, тем самым позволяя использовать нанопорошки твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-RF}_3\text{-YbF}_3$ (R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+}) для преобразования излучения не только в области 1.5 и 2.0 мкм, но и в области 1.0 мкм.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты могут найти применение в разработке высокоэффективных люминофоров для визуализации ИК излучения, улучшении характеристик солнечных батарей и создании антифальсификационных технологий. Кроме того, результаты диссертационной работы могут быть полезны в биомедицинских приложениях, таких как визуализация и диагностика тканей с использованием ИК излучения.

Надежность и достоверность результатов, полученных в работе Гущиным С.В., обоснована значительным количеством экспериментов, внутренней согласованностью, воспроизводимостью экспериментальных данных, полученных с помощью взаимодополняющих современных расчётно-теоретических и инструментальных методов исследования, среди которых особо стоит выделить оптические (спектроскопия поглощения и люминесценции, исследование кинетик затухания люминесценции).

Общая характеристика работы

Диссертация объёмом 156 страниц печатного текста состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы, содержащего 118 наименований. Текст включает 86 рисунков и 15 таблиц.

Во введении автор обосновывает выбор объектов исследования, актуальность темы, ставит цели и формулирует задачи и положения, выносимые на защиту, аргументирует практическую значимость и научную новизну проделанной работы, перечисляет основные методы исследования и приводит сведения об апробации результатов работы, публикациях, личном вкладе, структуре и объёме диссертации.

В первой главе, посвященной литературному обзору по теме диссертации, описана кристаллическая структура твердых растворов $\text{MF}_2\text{-RF}_3$ (M^{2+} - Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , R^{3+} - редкоземельными (РЗ) ионы) и отмечаются особенности процессов гетеровалентного замещения ионов M^{2+} РЗ ионами R^{3+} . Подробно рассматриваются возникающие структурные дефекты, эффект кластеризации, а также описываются типы оптических центров, формирующихся при легировании фторидных твердых растворов со структурой флюорита РЗ ионами. Детально рассматриваются процессы и механизмы, ответственные за возникновение ап-конверсионной люминесценции в кристаллах, легированных РЗ ионами. Подробно анализируются характеристики ап-конверсионной люминесценции фторидных твердых растворов со структурой флюорита $\text{MF}_2\text{-RF}_3$, $\text{MF}_2\text{-RF}_3\text{-YbF}_3$ (M^{2+} - Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} ; R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+}), при их возбуждении излучением с длинами волн 1.0 мкм, 1.5 мкм и 2.0 мкм. Подробно описываются факторы, влияющие на эффективность ап-конверсионной люминесценции твердых растворов $\text{MF}_2\text{-RF}_3$, $\text{MF}_2\text{-RF}_3\text{-YbF}_3$ (M^{2+} - Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} ; R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+}), к которым относятся концентрация РЗ ионов, вид катиона M^{2+} матрицы и способ получения твердого раствора.

Во второй главе автор описывает методы получения и пробоподготовки объектов исследования – образцов монокристаллов твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ и

нанопорошков твердых растворов $\text{CaF}_2\text{-ErF}_3$, $\text{SrF}_2\text{-RF}_3$, $\text{SrF}_2\text{-RF}_3\text{-YbF}_3$ ($\text{R}^{3+} - \text{Er}^{3+}$, Ho^{3+}).

Глава 2 также посвящена описанию экспериментальных методов исследования фазового состава, морфологии и спектрально-люминесцентных характеристик объектов исследования.

В третьей главе представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных характеристик монокристаллов и нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ при возбуждении уровней $^4\text{I}_{11/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+} излучением с длинами волн 972 и 1532 нм.

В параграфе 3.1 главы 3 представлены результаты исследования структуры монокристаллов и нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$, приводится зависимость параметра решетки монокристаллов и нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ от концентрации ErF_3 . Выявлено, что параметр решетки данных твердых растворов линейно уменьшается с ростом концентрации ErF_3 .

В параграфах 3.2 и 3.3 главы 3 описываются спектрально-люминесцентные характеристики монокристаллов и нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ при возбуждении уровней $^4\text{I}_{11/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+} методами оптической спектроскопии и радиометрии. Показано, что значения спектральной плотности мощности ап-конверсионной люминесценции, соответствующей оптическим переходам $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ионов Er^{3+} , а также значения энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции видимого спектрального диапазона (380-780 нм) для нанопорошков $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ на порядок ниже по сравнению с аналогичными значениями для монокристаллов, что обусловлено тушением люминесценции ионов Er^{3+} при их взаимодействии с ОН-группами.

Основным достоинством исследований, результаты которых приведены в третьей главе является экспериментальное доказательство предложенных процессов, ответственных за возникновение ап-конверсионной люминесценции ионов Er^{3+} в видимой области спектра для монокристаллов и нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ при возбуждении уровней $^4\text{I}_{11/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+} .

В четвертой главе приводится сравнительный анализ спектрально-люминесцентных характеристик нанопорошков твердых растворов $\text{CaF}_2\text{-ErF}_3$ и $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ при возбуждении уровня $^4I_{13/2}$ ионов Er^{3+} излучением с длиной волны 1532 нм.

В параграфе 4.1 главы 4 представлена характеристика нанопорошков твердых растворов $\text{CaF}_2\text{-ErF}_3$. Изучены фазовый состав, морфология и дисперсность нанопорошков твердых растворов $\text{CaF}_2\text{-ErF}_3$. Показано, что параметр решетки для нанопорошков твердых растворов $\text{CaF}_2\text{-ErF}_3$ линейно увеличивается с увеличением концентрации ErF_3 , а для нанопорошков $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ наблюдается обратная зависимость. Различный характер зависимости параметра решетки для нанопорошков твердых растворов $\text{CaF}_2\text{-ErF}_3$ и $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ объясняется совокупным действием двух факторов: наличием междоузельных ионов фтора и соотношением ионных радиусов Ca^{2+} и Er^{3+} , Sr^{2+} и Er^{3+} .

В параграфе 4.2 главы 4 проводится сравнительный анализ спектрально-люминесцентных характеристик ап-конверсионной люминесценции нанопорошков $\text{CaF}_2\text{-ErF}_3$ и $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ при их возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1532 нм. Показано, что несмотря на более высокие значения вероятности процессов многофононной релаксации, нанопорошки твердых растворов $\text{CaF}_2\text{-ErF}_3$ при возбуждении уровня $^4I_{13/2}$ ионов Er^{3+} характеризуются большими значениями спектральной плотности мощности и энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции по сравнению с нанопорошками твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$. Полученные меньшие значения спектральной плотности и энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$, автор объясняет взаимодействием ионов Er^{3+} с ОН-группами, находящимися внутри пор агломератов, образованных из более мелких частиц $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ с развитой поверхностью, содержащих ОН-группы.

Также в параграфе 4.2 главы 4 приводятся результаты, на основании которых делаются выводы о взаимосвязи координат цветности ап-конверсионной люминесценции нанопорошков твердых растворов $\text{CaF}_2\text{-ErF}_3$ и $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ с

соотношением интенсивности полос люминесценции оптических переходов $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ и $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} .

В пятой главе рассматриваются характеристики ап-конверсионной люминесценции нанопорошков твердых растворов SrF_2-HoF_3 при возбуждении уровня 5I_7 ионов Ho^{3+} излучением с длиной волны 1940 нм.

В параграфе 5.1 главы 5 автор приводит результаты исследования фазового состава, морфологии и дисперсности нанопорошков SrF_2-HoF_3 . Установлено, что для нанопорошков твердых растворов SrF_2-HoF_3 параметр решетки демонстрирует линейное уменьшение с увеличением концентрации HoF_3 . Аналогичное поведение параметра решетки также получено автором для нанопорошков твердых растворов SrF_2-ErF_3 . Результаты изображений просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) свидетельствуют о том, что нанопорошки твердых растворов SrF_2-HoF_3 также достаточно сильно агломерированы, как и нанопорошки твердых растворов SrF_2-ErF_3 .

В параграфе 5.2 главы 5 рассматриваются результаты исследования спектрально-люминесцентных характеристик ап-конверсионной люминесценции нанопорошков твердых растворов SrF_2-HoF_3 при возбуждении уровня 5I_7 ионов Ho^{3+} . По результатам исследований, значения энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции в видимом спектральном диапазоне концентрационного ряда нанопорошков твердых растворов SrF_2-HoF_3 при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1940 нм и плотностью мощности 28 Вт/см^2 не превышают $0.03 \pm 0.01 \%$.

В шестой главе исследовалось влияние солегирования ионами Yb^{3+} на характеристики ап-конверсионной люминесценции нанопорошков твердых растворов $SrF_2-RF_3-YbF_3$ ($R^{3+} - Er^{3+}, Ho^{3+}$) при возбуждении уровней $^4I_{13/2}$ и 5I_7 ионов Er^{3+} и Ho^{3+} .

В параграфе 6.1 главы 6, по аналогии с главами 3-5 приводятся результаты исследования структуры, морфологии и дисперсности нанопорошков твердых растворов $SrF_2-RF_3-YbF_3$ ($R^{3+} - Er^{3+}, Ho^{3+}$). В параграфах 6.2 и 6.3 главы 6 приводятся результаты исследования влияния солегирования ионами Yb^{3+} на

спектрально-люминесцентные характеристики нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-RF}_3\text{-YbF}_3$ (R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+}) при возбуждении уровней $^4\text{I}_{13/2}$ и $^5\text{I}_7$ ионов Er^{3+} и Ho^{3+} , в частности на значения энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции. По результатам исследований было получено, что солегирование ионами Yb^{3+} нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ и $\text{SrF}_2\text{-HoF}_3$ не приводит к уменьшению энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции в видимой области спектра при возбуждении уровня $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+} и уровня $^5\text{I}_7$ ионов Ho^{3+} .

Основным достоинством исследований, описание которых приведено в шестой главе является экспериментальное доказательство целесообразности использования нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-RF}_3$ (R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+}), солегированных с ионами Yb^{3+} для расширения спектрального диапазона преобразования излучения.

В заключении сформулированы основные, полученные в ходе работы научные результаты. Дополнительно указывается на их фундаментальную (в материаловедческом аспекте) и практическую (в части разработки высокоэффективных люминофоров для визуализации излучения ИК спектрального диапазона).

По диссертационной работе Гущина Сергея Вячеславовича имеется ряд замечаний:

1. Значение энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции в видимой области спектра нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-HoF}_3$ при возбуждении уровня $^5\text{I}_7$ ионов Ho^{3+} ниже аналогичных величин для нанопорошков твердых растворов $\text{SrF}_2\text{-ErF}_3$ при возбуждении уровней $^4\text{I}_{11/2}$ и $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+} . В работе не дается объяснение данному факту.

2. В диссертационной работе средний размер частиц нанопорошков твердых растворов $\text{CaF}_2\text{-ErF}_3$, $\text{SrF}_2\text{-RF}_3$, $\text{SrF}_2\text{-RF}_3\text{-YbF}_3$ (R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+}) определен из распределений, полученных по изображениям ПЭМ. Было бы уместно провести измерение среднего размера частиц методами динамического рассеяния света или статической дифракции.

3. В работе автор неоднократно отмечает, что для фторидных твердых растворов со структурой флюорита, легированных РЗ ионами, характерна более эффективная ап-конверсионная люминесценция по сравнению с другими матрицами, например оксидными с РЗ ионами. В соответствии с этим было бы уместно сравнить результаты энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции твердых растворов, исследованных в настоящей работе с аналогичными значениями какой-либо из оксидных матриц с аналогичными активаторами.

4. В работе встречаются стилистические неточности и грамматические ошибки.

Вышеприведенные замечания имеют рекомендательный характер и не изменяют положительной оценки работы. Диссертационная работа представляет собой научное исследование, с использованием современных инструментальных методов анализа. Сделанные в диссертации выводы являются обоснованными, работа обладает теоретической и практической значимостью, а также научной новизной.

Публикации по теме диссертации и автореферат полно отражают её основное содержание. Результаты исследований прошли апробацию на ряде научных мероприятий и вошли в тезисы докладов российских и международных конференций. По теме диссертации опубликовано 6 статей, входящих в перечень ВАК РФ и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, в том числе в таких высокорейтинговых журналах как Optics and Spectroscopy, Journal of Luminescence, Optical Materials Express, Chinese Optics Letters. Также результаты диссертационного исследования отражены в 1 патенте на изобретение.

Закключение о соответствии диссертационной работы требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (далее — Положение), с учётом соответствия формуле специальности 1.3.8. — «Физика конденсированного состояния».

Диссертация Гущина Сергея Вячеславовича «Характеристики ап-конверсионной люминесценции твердых растворов $\text{MF}_2\text{-RF}_3$ (M^{2+} - Ca^{2+} , Sr^{2+} ; R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+})» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную тему. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и в соответствии с п. 9 раздела II Положения и в ней изложены новые **научно-обоснованные результаты**. Исследование спектрально-люминесцентных характеристик твердых растворов со структурой флюорита $\text{MF}_2\text{-RF}_3$ (M^{2+} - Ca^{2+} , Sr^{2+} ; R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+}) имеет важное фундаментальное и практическое значение для разработки элементов и методик, в которых необходима визуализация излучения ИК спектрального диапазона. Результаты работы Гущина С.В. могут быть рекомендованы для использования в следующих организациях Российской Федерации, деятельность которых лежит в области исследования свойств фторидных твердых растворов со структурой флюорита: ФГБУН ФИЦ «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС), ФГБУН Институт спектроскопии РАН (ИСАН), ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (КФУ), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» (НИУ ИТМО).

Диссертационная работа обладает целостностью и четкой логической структурой, включает новые научные результаты и положения, ее структура и содержание соответствует заявленным целям исследования. Достоверность полученных результатов подтверждается значительным объемом выполненных исследований, использующих современные взаимодополняющие методы, а также

применением подходов, принятых в мировой научной практике для обработки и интерпретации данных. Основные результаты работы прошли успешную апробацию на российских и международных конференциях. Количество публикаций автора соответствует требованиям пункта 13 раздела II Положения. Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации.

Таким образом, стоит заключить, что по своей актуальности, научной новизне и практической значимости, а также личному вкладу автора представленная диссертационная работа «Характеристики ап-конверсионной люминесценции твердых растворов $\text{MF}_2\text{-RF}_3$ (M^{2+} - Ca^{2+} , Sr^{2+} ; R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+})» полностью отвечает требованиям раздела II Положения, а по формуле и области исследования соответствует специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, охватывающей, в том числе, экспериментальное исследование природы кристаллических и аморфных, неорганических и органических веществ в твердом и жидком состояниях и изменение их физических свойств при различных внешних воздействиях.

Считаю, что по актуальности, научной новизне и личному вкладу автора диссертационная работа на тему «Характеристики ап-конверсионной люминесценции твердых растворов $\text{MF}_2\text{-RF}_3$ (M^{2+} - Ca^{2+} , Sr^{2+} ; R^{3+} - Er^{3+} , Ho^{3+})», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния» полностью соответствует требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор **Гущин Сергей Вячеславович**, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории спектроскопии перспективных материалов
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института спектроскопии Российской академии наук
Адрес: 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5
тел.: +7 (495) 851-0235

E-mail:

[REDACTED]



Болдырев Кирилл Николаевич

«20» декабря 2024 г.

Подпись руки Болдырева К.Н. заверяю:

Ученый секретарь Института спектроскопии РАН

[REDACTED]

Кильдиярова Р.Р.

«22» декабря 2024 г.