



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ИГУ»)

ПРОРЕКТОР ПО НАУЧНОЙ РАБОТЕ И
МЕЖДУНАРОДНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

К.Маркса ул., д.1, г. Иркутск, 664003

Тел.: (3952) 521-902 Факс: (3952) 20-13-07

ОКПО 02068226, ОГРН 1033801008218,

ИНН/КПП 3808013278/380801001

www.isu.ru, e-mail: prorectornir@isu.ru

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
международной деятельности
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Иркутский государственный

университет»

К.В. Григоричев

» мая 2019 г.

ОТЗЫВ

**о диссертации ЦЗЮЙ ЯНЯН «Нагревание светодиодных люминофоров при
преобразовании энергии возбуждения в люминесценцию», представленной на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 –
Физика конденсированного состояния**

Актуальность работы. Светодиодная техника в настоящее время является доминирующей в освещении. По световой отдаче, сроку службы характеристики светодиодов уже превышают характеристики других источников света, хотя еще и не достигли возможного физического предела. В наиболее распространенной конструкции светодиодные источники (СДИ) света представляет собою комбинацию чипа, излучающего в синей области спектра, и люминофора, преобразующего часть излучения чипа в люминесценцию видимой области спектра. Люминофором определяется эффективность и спектр излучения, то есть количественные и качественные характеристики источника света. Люминофором определяется стабильность излучения источника и его деградация. Стабильность проявляется в величине спада яркости с ростом температуры за счет температурного тушения люминесценции. Деградация - в спаде яркости за счет изменения структуры люминофора при длительном нагревании. Источниками тепла являются чип и сам люминофор. В опубликованной к настоящему времени литературе мало сведений о величине нагрева СДИ и процессах, приводящих к нагреву. Есть информация о температуре СДИ и световых приборов в целом и ее зависимости от режимов питания, конструкции. Имеются утверждения о возможности нагревания люминофора в процессе преобразования энергии. Но нет теоретических и экспериментальных оценок этого эффекта. В работе Цзюй Янян поставлена цель: сделать оценку нагревания люминофора только за счет процессов, протекающих при преобразовании энергии возбуждения. Оценка этих потерь принципиально важна как для решения проблем синтеза стабильных люминофоров, так и для выбора источников света для конкретных целей, прогнозирования поведения светодиодных систем. Поэтому работа, безусловно, является актуальной.

Структура и объем работы. Диссертационная работа Цзюй Янян состоит из введения, 6 глав: литературный обзор по проблеме, описание методов исследований и выбора материалов для исследований, четыре главы с описанием результатов исследований, заключения и списка литературы из 146 наименований. Результаты диссертационных исследований изложены на 155 страницах машинописного текста, 78 рисунках и в 17 таблицах.

Во введении приведена общая информация о состоянии проблемы, сформулированы цели, задачи исследований, основные защищаемые положения, научная и практическая значимость работы.

Глава 1 содержит описание принципа работы СДИ, роли люминофора в нем. Кратко изложены сведения о люминофоре на основе ИАГ:Се. Описаны возможные каналы потерь энергии в СДИ, чипе и люминофоре, состояние исследований процессов нагревания и способов используемых методов оценки температуры чипа и СДИ.

Во второй главе приведено описание использованных методов исследования структуры люминофоров. Обоснован выбор люминофоров для исследований. Приведена информация о структуре, составе исследованных люминофоров. Результаты исследований приведены только для некоторых люминофоров для демонстрации, примера. В целом вся информация о люминофорах приведена в таблицах и описаниях.

Третья глава диссертации посвящена описанию результатов исследования люминесцентных свойств двух серий люминофоров. Получен большой объем фактической информации о спектрально-кинетических характеристиках люминофоров. Результаты исследований систематизированы. Представлены в виде таблиц с основными характеристиками. Материалы могут быть полезны при продолжении исследований этих люминофоров.

В четвертой главе представлен алгоритм расчета предельно достижимых значений энергетической и световой эффективности преобразования излучения чипа люминофором. Выполнен цикл расчетов, позволивший установить относительную величину потерь энергии при преобразовании, предельно возможные значения световой отдачи для конкретных пар чип-люминофор.

В пятой и шестой главах представлены результаты исследования температурных зависимостей тушения люминесценции в люминофорах. Описан разработанный экспериментальный стенд для исследований. Выявлены закономерности тушения, разработана модель, объясняющая зависимость различия зависимостей в люминофорах с гадолинием и без гадолиния. Определен экспериментально диапазон температур, на которую нагреваются люминофоры при возбуждении излучением лазера с длиной волны излучения 337 нм.

В заключении диссертации подведены итоги проведенных исследований.

В качестве **основных положений**, выносимых на защиту, названы следующие.

1. Установлено существование различия в формах полос люминесценции ИАГ:Се люминофоров серий СДЛ 2700 – 4000 и YAG 01 – 06. Различие обусловлено разницей в состоянии и уровне собственной дефектности, вводимой в микрокристаллы при синтезе люминофоров в отличающихся условиях.
2. Алгоритм и результаты расчётов стоксовых потерь энергии при преобразовании излучения чипа в люминесценцию для конкретных пар: чип – люминофор. Величина потерь энергии в «белых» СДИ с исследованными люминофорами не может быть менее 28% при возбуждении излучением чипа в области 460 нм и 40% при возбуждении излучением чипа в области 340 нм. Предельные значения величины световой отдачи белого СДИ с люминофором на основе ИАГ:Се при возбуждении излучением чипа на 454 нм не могут быть больше 362 Лм/Вт, излучением чипа на 344 нм – 303 Лм/Вт.
3. Модель, описывающая зависимость температурного тушения люминесценции люминофоров от содержания в них ионов гадолиния, входящих при синтезе замещением ионов иттрия. Вид конфигурационной кривой центра свечения в

возбуждённом состоянии в ИАГ:Ce³⁺ определяется наличием иона замещения в окружении иона церия.

4. Возбуждение люминофоров излучением лазера с $\lambda=337$ нм с плотностью мощности 2 мВт/см² приводит к повышению их температуры: на 14 ± 2 °С в СДЛ 2700 и 18 ± 7 °С в YAG 06. Время нагревания составляет 30 минут в люминофорах типа СДЛ и 200 минут в YAG.

В целом, все основные положения имеют достаточные обоснования проведенными анализами результатов исследований, изложенными в диссертации Цзюй Янян.

Основными существенными результатами работы представляются следующие.

1. Для выбора люминофоров для исследований использован новый интересный подход. Выбраны две серии ИАГ:Ce промышленных люминофоров двух разных производителей. Все выбранные люминофоры имеют хорошие характеристики, пользуются спросом, их синтез проводился по подобным, близким, но очевидно различающимся технологиям. Использовались для исследований также люминофоры одного типа, но разных лет выпуска по неизменной технологии. Совокупность результатов исследований серий люминофоров позволяет сделать совершенно однозначный вывод: люминофоры двух серий имеют большие различия в концентрациях собственных дефектов. Сопоставление результатов комплексных исследований таких серий люминофоров может по крайней мере выделить влияние собственных дефектов, способствовать развитию представлений о процессах в люминофорах. А в будущем – привести к созданию методов оценки концентраций собственных дефектов решетки, совершенствованию технологии синтеза люминофоров с повышенными свойствами.
2. Основное отличие модели, объясняющей различие зависимости тушения люминесценции от температуры в люминофорах с гадолинием и без гадолиния, заключается во введении предположения о форме потенциальной кривой уровня центра свечения в возбужденном состоянии в кристаллах с гадолинием и обоснование формы этой кривой.
3. Люминофоры серий СДЛ 2700-4000 и YAG 01-06 различаются формой полос люминесценции и возбуждения. Различие обусловлено состоянием собственной дефектности в этих люминофорах, то есть дефектами, вводимыми и формирующимися при синтезе. Установлено, что различие в технологических режимах синтеза приводит к формированию совокупности нанодефектов, с идентичным качественным составом, но различающимся соотношением компонентов состава.
4. Разработан алгоритм расчёта минимальных предельных значений потерь энергии излучения чипа при преобразовании люминофором этой энергии в люминесценцию для конкретных пар чип-люминофор.. Тепловые потери определяются взаимным

положением спектров излучения чипа и люминофора. Установлено, что для всех исследованных ИАГ:Се люминофоров при возбуждении излучением чипа с $\lambda=454, 344, 240$ нм, предельные потери на нагрев люминофора равны 24...31 %, 39 ...44 %, 49...56 %, соответственно.

5. Оценена величина изменения температуры люминофора при возбуждении в области УФ излучения. Возбуждение излучением лазера с $\lambda=337$ нм и плотностью мощности 2 мВт/см^2 приводит к повышению температуры люминофоров: на $14\pm 2^\circ\text{C}$ в СДЛ 2700 и $18\pm 7^\circ\text{C}$ в YAG 06.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Полученная информация о структурных и люминесцентных свойствах двух групп ИАГ:Се люминофоров, являющаяся базой данных по промышленным люминофорам, важна для дальнейших исследований, анализов и совершенствования технологий синтеза.
2. Разработан и создан экспериментальный стенд для исследования температурной зависимости люминесценции люминофоров, позволяющий проводить анализ кинетики температурного тушения люминесценции при раздельном влиянии на люминофор внешнего нагревателя и нагрева при преобразовании энергии возбуждения.
3. Показано, что физический предел световой отдачи в светодиоде с преобразованием спектра определяется потерями энергии при преобразовании. Предельные значения величины световой отдачи белого СДИ при возбуждении излучением чипа на 454 нм не могут быть больше 362 Лм/Вт, излучением чипа на 344 нм – не больше 303 Лм/Вт. Предельные значения величины световой отдачи СДИ зависят от вида спектра люминесценции люминофора. У СДИ “тёплого” света световая отдача всегда меньше, чем у СДИ “холодного” света.
4. Впервые в кинетике затухания люминесценции люминофоров СДЛ-серии при оптическом возбуждении выделен кратковременной компонент с $\tau_1 \sim 1,5\text{--}4$ нс, дополнительно к известному с $\tau_2 \sim 60\text{--}68$ нс.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность результатов исследования обеспечивается корректностью постановки задач и цели, использованием современных методов и методик исследования, большим объемом взаимно дополняющих экспериментальных данных, тщательностью их обработки, обоснованностью использованных методов теоретической оценки эффективности процессов, соответствием установленных в работе закономерностей с фактами, полученными другими исследователями.

Апробация результатов исследований.

Материалы исследований, изложенные в диссертации, опубликованы достаточно полно в 8 основных статьях в журналах из списка рекомендованных ВАК и в зарубежных журналах, индексируемых международными базами Scopus, WOS. Все положения, выносимые на защиту, достаточно полно опубликованы. Результаты работы обсуждались на 11 конференциях, в том числе и международных. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и опубликованных работ.

Содержание автореферата соответствует изложенным в диссертации материалам.

Имеются следующие замечания по работе:

1. В работе приведены результаты расчетов предельных значений световой отдачи СДИ, потерь энергии для исследованных люминофоров с выбранным чипом. Для практических целей важно знать, какие предельные значения световой отдачи можно достичь при использовании идеального люминофора, обеспечивающего отличную световую и цветопередачу. Можно же было подобрать гипотетический спектр излучения люминофора, который бы позволил получить индекс цветопередачи более 95. Тогда можно было бы делать и более общее заключение о предельной световой отдаче СДИ.
2. В работе было показано, что время затухания люминесценции при повышенных температурах в люминофорах, изготовленных в НПО Платан много меньше, чем в изготовленных в GrandLux. Непонятно, чем вызвано это различие. Почему нет никаких предположений относительно существования этого эффекта?
3. Главы 2 и 3 содержат много полезной информации о свойствах исследованных люминофоров. К сожалению, описание структурных и люминесцентных свойств в этих главах очень краткое. Используется в диссертации только часть информации. Можно было бы сделать приложение к диссертации с этой информацией, которая быполнила базу данных о люминофорах.
4. В дополнение к расчетному методу определения температуры люминофора при нагреве в процессе его работы было бы полезно использовать её прямое измерение.
5. В списке основных работ, опубликованных по теме диссертации, приведенном в автореферате, две публикации с номерами 2 и 5 следовало бы дать под одним номером, так как статья под номером 5 является англоязычным переизданием русскоязычной статьи под номером 2 в англоязычной версии того же журнала.
6. Встречаются в диссертации грамматические и синтаксические ошибки. Например, не проставлены знаки препинания в предложениях на стр. 45 (прежде всего), стр. 61 (В основном....). На стр. 49: «образцы люминофоров...полученные с помощью SEM», на стр. 95: «...50% подводимой теряется...», пропущено слово «энергии». Тем не менее, следует подчеркнуть, что для иностранного соискателя уровень грамотности является достаточно высоким.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния в пунктах: 4) теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений на природу изменений физических свойств конденсированных веществ.

Заключение.

Диссертационная работа Цзюй Янян «Нагревание светодиодных люминофоров при преобразовании энергии возбуждения в люминесценцию» является завершенной квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача по оценке величины нагрева и предельно возможных потерь энергии в люминофорах при преобразовании энергии возбуждения. Полученные результаты необходимы для совершенствования технологий синтеза люминофоров для светодиодов не только ИАГ:Се составов, но и других многокомпонентных, для выбора люминофоров с другими чипами, при проектировании светодиодных светильников и источников света.

Диссертация удовлетворяет всем критериям, которым должна соответствовать работа, представленная на соискание ученой степени кандидата наук в соответствии с пп. 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.0.4.0.7 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Цзюй Янян и отзыв на нее обсуждены на объединенном научном семинаре по физике конденсированного состояния при диссертационном совете Иркутского государственного университета (протокол заседания № 1 от 15 мая 2019 г.) с приглашением ведущих специалистов Иркутского филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук и федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии Сибирского отделения Российской академии наук.

Председатель семинара –

**профессор, доктор физико–математических наук,
профессор кафедры общей и экспериментальной физики ИГУ**

 **Мартынович Евгений Федорович**

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», г. Иркутск, 664003 г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

Сайт: www.isu.ru

E-mail: prorectornir@isu.ru; femto@bk.ru

Тел: (3952) 521-902, 89500555133