

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.3.038.825.2

ДЕМЕШ  
Максим Петрович

## **СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ВАНАДАТОВ, ВОЛЬФРАМАТОВ И ФТОРИДОВ С ТРЕХВАЛЕНТНЫМИ ИОНАМИ НЕОДИМА, ТЕРБИЯ И ЕВРОПИЯ КАК АКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СРЕД**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.05 – оптика

Минск, 2020

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель – **Ясюкевич Анатолий Сергеевич**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник  
научно-исследовательского центра  
оптических материалов и технологий филиала  
Белорусского национального технического  
университета «Научно-исследовательский  
политехнический институт».

Официальные оппоненты: **Гапоненко Николай Васильевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры микро-и нанозлектроники  
УО «Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»;

**Стельмах Георгий Фомич**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
доцент кафедры физической оптики и  
прикладной информатики  
Белорусского государственного университета.

Оппонирующая организация – Государственное научное учреждение  
«Институт физики им. Б.И. Степанова  
НАН Беларуси».

Защита состоится 13 марта 2020 г. в 14.00 на заседании совета по защите  
диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете  
по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета),  
ауд. 407. Телефон учёного секретаря: 209-55-58.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке  
Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «07» февраля 2020 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



О.Г. Романов

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

## ВВЕДЕНИЕ

Многообразие кристаллических сред и ионов-активаторов (редкоземельных элементов (РЗЭ) и переходных металлов (ПМ)) обеспечивает возможность получения лазерной генерации в широком диапазоне спектра. Тем не менее, остается актуальной задача поиска и исследования новых лазерных сред, которая заключается в целенаправленном выборе иона-активатора и матрицы, комбинация которых обладала бы требуемыми характеристиками.

Одним из перспективных классов лазерных сред являются разупорядоченные кристаллы с ионами РЗЭ, в частности с трехвалентными ионами неодима ( $\text{Nd}^{3+}$ ). Такие среды обладают широкими линиями в спектрах поглощения и усиления, что представляет интерес для определенных лазерных применений. К тому же кристаллические среды характеризуются лучшими оптико-механическими свойствами по сравнению с лазерными стеклами.

В последнее время наблюдается значительный интерес к лазерам, генерирующим непосредственно в видимом спектральном диапазоне при накачке излучением InGaN лазерных диодов (ЛД), а также оптически накачиваемых полупроводниковых лазеров. Наиболее перспективными ионами видимой области спектра, кроме хорошо известного празеодима ( $\text{Pr}^{3+}$ ), являются европий ( $\text{Eu}^{3+}$ ) и тербий ( $\text{Tb}^{3+}$ ). В настоящее время в качестве матриц для таких ионов-активаторов, как правило, используются фторидные кристаллы. Они обладают малой энергией фононов и силой кристаллического поля, а также большей шириной запрещенной зоны по сравнению с большинством оксидных кристаллов.

Тем не менее, среди оксидных кристаллов, активированных ионами РЗЭ, можно выделить матрицы, которые представляют интерес для изучения перспективности использования их в качестве лазерных сред для получения генерации в видимой области спектра. Например, кристаллы калиевых вольфраматов, активированные ионами  $\text{Tb}^{3+}$ , обладают высокими значениями поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания (СИ), а также слабым концентрационным тушением люминесценции иона-активатора.

Большой интерес для научных и практических применений представляют лазеры видимого диапазона спектра, работающие в режиме пассивной модуляции добротности. В связи с этим, представляет большой интерес поиск материалов, которые могут быть использованы как насыщающиеся поглотители для видимой области спектра. В данном направлении целесообразно сосредоточиться на кристаллических средах с ионами ПМ, поскольку они обладают меньшей энергией насыщения и более высокой лучевой стойкостью по сравнению с 2D-материалами, широко исследующимися в настоящее время.

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

2

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с заданиями, входящими в государственные программы научных исследований «Электроника и фотоника», подпрограмма «Развитие методов и технологий современной оптики и лазерной физики для использования в промышленности, медицине, сельском хозяйстве, охране окружающей среды, обороне» 2011–2015 г., задание 2.2.01 «Разработка новых кристаллических и стеклокристаллических активных сред и создание твердотельных лазерных систем на их основе, излучающих в видимом и ИК диапазонах спектра в режимах непрерывной генерации, модуляции добротности, генерации и усиления фемтосекундных импульсов для применения в прецизионной обработке материалов, системах наблюдения, локации и дальнометрии» (номер госрегистрации 20111355) и задание 2.2.10 «Исследование новых кристаллических и стеклокристаллических активных сред и создание твердотельных лазеров ИК диапазона на их основе для медицины, дальнометрии и промышленных применений» (номер госрегистрации 20111035); в рамках проектов Министерства образования Республики Беларусь ГБ №15-04 «Исследование спектроскопических и генерационных характеристик кристаллов двойных молибдатов и ванадатов с разупорядоченной структурой легированных ионами  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ » (номер госрегистрации 20150356) Министерства образования Республики Беларусь и ГБ №16-165 «Лазеры на основе кристаллов кальциевых ванадатов и фторидов, излучающие в области 1 мкм» аспирантский грант (номер госрегистрации 20164042); а также в рамках программы финансирования краткосрочных исследовательских программ Германской службы академических обменов (DAAD) «Novel active media for visible solid state lasers», № 57314022.

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. №585: разделам 6.4 «Новые типы лазеров в широком спектральном, временном и мощностном диапазонах, в том числе твердотельные и волоконно-оптические лазеры, лазеры на свободных электронах» и 6.5. «Физические основы и разработка лазерных, оптико-электронных технологий и приборов, в том числе приборов ночного видения» и на 2016–2020 годы, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. №190: раздел 6 «Электроника и фотоника».

### Цель и задачи исследования

*Целью диссертационной работы* являлось определение и исследование спектроскопических характеристик кристаллов ванадатов, активированных ионами  $\text{Nd}^{3+}$ , фторидов с ионами  $\text{Eu}^{3+}$  и вольфраматов с ионами  $\text{Tb}^{3+}$ , как активных материалов твердотельных лазеров и нелинейных спектроскопических свойств кристалла шпинели с ионами  $\text{Co}^{2+}$  как пассивного модулятора лазеров видимого диапазона.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

1. Исследовать спектрально-кинетические и генерационные свойства новых кристаллов двойных кальциевых ванадатов, активированных трехвалентными ионами неодима  $\text{Nd}^{3+}$ .

2. Определить лазерно-спектроскопические характеристики кристаллов иттрий-литиевого фторида с ионами трехвалентного европия  $\text{Eu}^{3+}$  и калий-иттриевого вольфрамата с ионами трехвалентного тербия  $\text{Tb}^{3+}$  и изучить возможность их применения в качестве лазерных материалов видимой области спектра.

3. Исследовать нелинейные спектроскопические свойства кристалла  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  в спектральном диапазоне 0,5–0,65 мкм и изучить возможность его применения как пассивного затвора лазеров на ионах празеодима.

*Объектами исследования являются:*

– кристаллы двойных кальциевых ванадатов, активированные ионами неодима  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{Y}(\text{VO}_4)_7$ ,  $\text{Ca}_9\text{Nd}(\text{VO}_4)_7$ ,  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ ,  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$ ,  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$ ;

– кристалл литий-иттриевого фторида, активированный ионами европия  $\text{Eu}^{3+}:\text{LiYF}_4$ ;

– кристалл калий-иттриевого вольфрамата, активированный ионами тербия  $\text{Tb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ ;

– кристалл магний-алюминиевой шпинели, активированный ионами кобальта  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ .

*Предметом исследования* являлись абсорбционно-люминесцентные свойства указанных выше материалов, а также мощностные и спектральные характеристики выходного излучения лазеров на кристаллах  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$ ,  $\text{Eu}^{3+}:\text{LiYF}_4$  и  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ .

## Научная новизна

1. Определены спектроскопические характеристики ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в семействе кристаллов двойных кальциевых ванадатов и исследовано влияние на них состава матрицы данных кристаллов.

2. Установлена принадлежность кристаллов кальциевых ванадатов, активированных ионами неодима, к слаботушащимся средам.

3. Впервые реализована лазерная генерация на кристалле  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$  при диодной накачке в импульсно-периодическом режиме. Сделана оценка перспективности кристаллов данного семейства для применений в качестве активных сред твердотельных диодно-накачиваемых лазеров.

4. Впервые определены поперечные сечения поглощения и стимулированного испускания ионов  $\text{Eu}^{3+}$  в кристалле  $\text{LiYF}_4$ . Впервые получена непрерывная генерация на кристалле  $\text{Eu}^{3+}:\text{LiYF}_4$  на переходе иона европия  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_4$ , что соответствует длине волны 702 нм.

5. Впервые определены поперечные сечения поглощения и стимулированного испускания ионов  $\text{Tb}^{3+}$  в кристалле  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ . Определены параметры интенсивности в поглощении и вероятности переходов в испускании. Проведена оценка перспективности тербийсодержащих кристаллов калиевых вольфраматов в качестве активной среды лазеров видимого диапазона спектра.

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

6. Впервые определены характеристики нелинейного поглощения для кристалла  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  в спектральном диапазоне 0,5–0,65 мкм. Впервые реализован режим модулированной добротности лазера на кристалле  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$  на длинах волн 523, 607 и 640 нм при использовании  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  в качестве насыщающегося поглотителя.

## Положения, выносимые на защиту

1. В кристаллах двойных кальциевых ванадатов, активированных ионами неодима, значения параметра Джадда-Офельта –  $\Omega_2$  и интенсивности сверхчувствительного перехода  ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{G}_{5/2}$  определяются симметрией локального окружения иона неодима, которая понижается в ряду кристаллов  $\text{Ca}_9\text{Y/Ln}(\text{VO}_4)_7$  от иона иттрия к иону неодима и лантана и для кристаллов вида  $\text{Ca}_{10}\text{K/Li}(\text{VO}_4)_7$  от иона калия к иону лития.

2. Режим релаксации возбужденного состояния  ${}^4\text{F}_{3/2}$  иона неодима для самоактивированного кристалла  $\text{Ca}_9\text{Nd}(\text{VO}_4)_7$  близок к сверхмиграции, когда скорость миграции энергии по донорной системе превосходит скорость распада возбужденного состояния при непосредственном донор-акцепторном взаимодействии, что обусловлено нарушением согласования энергий переходов  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  и  ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  иона неодима в данном кристалле.

3. Высокие значения поперечных сечений поглощения перехода  ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{L}_6$  и стимулированного испускания перехода  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_4$  иона  $\text{Eu}^{3+}$  в кристалле  $\text{LiYF}_4$  позволяют реализовать непрерывную генерацию на длине волны 702 нм.

4. Кристалл  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  при использовании в качестве пассивного затвора обеспечивает режим модулированной добротности в лазере на кристалле  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$  в области спектра 0,5–0,64 мкм благодаря превышению поперечных сечений поглощения из основного состояния  ${}^4\text{A}_2$  иона кобальта над поперечными сечениями стимулированного испускания иона празеодима в данной области.

## Личный вклад соискателя ученой степени

Лично соискателем были зарегистрированы спектры люминесценции и поглощения кристаллов с ионами РЗЭ, было исследовано насыщение поглощения в магний-алюминиевой шпинели с ионами кобальта, было изучено затухание люминесценции редкоземельных ионов-активаторов. На основе экспериментальных данных были рассчитаны поперечные сечения поглощения и стимулированного испускания, определены параметры, определяющие интенсивности линий в спектрах поглощения и люминесценции. Выполнены эксперименты по получению лазерной генерации в непрерывном режиме и режиме модуляции добротности, дана интерпретация полученных результатов, сформулированы основные выводы и положения, выносимые на защиту. Руководителю работы ведущему научному сотруднику НИЦ ОМТ Ясюкевичу А.С. а также научному консультанту НИЦ ОМТ Кулешову Н.В. принадлежит общее руководство работой, участие в постановке задач, обсуждение полученных результатов исследования. Соавтор совместных публикаций Кисель В.Э. принимал участие в постановке лазерных экспериментов и

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

обсуждении результатов. Соавтор Корниенко А.А. оказывал консультации при расчете интенсивностей f-f переходов. Соавтор Крэнкель К. оказал содействие при проведении лазерных экспериментов в видимой области спектра. Соавторы Шеховцов А.Н., Космына М.Б., Павлюк А.А. выращивали исследуемые в диссертации образцы кристаллов. Остальные соавторы занимались изучением вопросов, не вошедших в диссертацию.

## **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Конференция стран СНГ по росту кристаллов (г. Харьков, Украина, 2012); Международная конференция по оксидным материалам и электронной инженерии (г. Львов, Украина, 2012); Международная конференция по росту кристаллов и эпитаксии (г. Варшава, Польша, 2013); XVI международный Феофиловский симпозиум (г. Санкт-Петербург, РФ, 2015); Международная конференция «Физика конденсированного состояния» (г. Гродно, 2015); Международная научно-техническая конференция «Приборостроение» (г. Минск, 2014, 2016); Международная конференция «Современные лазеры и источники фотонов» (г. Иокогама, Япония, 2017); Европейская конференция по лазерам и электрооптике CLEO/Europe (г. Мюнхен, Германия, 2017); Международная конференция «Оптика лазеров» (г. Санкт-Петербург, РФ, 2018); Европейская конференция по твердотельным и волоконным источникам когерентного излучения (Europhoton) (г. Барселона, Испания, 2018).

Результаты диссертации нашли применение в технологии выращивания кристаллов в Институте монокристаллов НАН Украины и НП ООО «Соликс»; внедрены в учебный процесс на кафедре лазерной техники и технологии приборостроительного факультета БНТУ и на кафедре информационных систем и автоматизации производства факультета информационных технологий и робототехники ВГТУ (имеются 4 акта о внедрении).

## **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 научных работах, из которых: 7 статей в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 3,5 авторского листа), 5 статей в сборниках материалов научных конференций, 6 тезисов.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 134 страницы, в том числе 62 рисунка занимают 25 страниц, 37 таблиц – 10 страниц, приложение – 5 страниц. Библиографический список содержит 180 наименований, включая собственные публикации соискателя ученой степени.

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Определены спектроскопические характеристики кристаллов двойных кальциевых ванадатов:  $\text{Ca}_9\text{Y}(\text{VO}_4)_7$ ,  $\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ ,  $\text{Ca}_9\text{Nd}(\text{VO}_4)_7$ ,  $\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$ ,  $\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$  – легированных трехвалентными ионами неодима. Зарегистрированы спектры поглощения в поляризованном свете. Определены спектры поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания. В рамках стандартной теории Джадда-Оффельта были рассчитаны силы линий абсорбционных и излучательных переходов, что позволило определить значения излучательного времени жизни метастабильного состояния  ${}^4\text{F}_{3/2}$  иона неодима, а также коэффициенты ветвления люминесценции с данного уровня [1–3, 8, 9, 12–14].

Для определения квантового выхода люминесценции с уровня  ${}^4\text{F}_{3/2}$ , а также процессов его дезактивации были зарегистрированы кинетики затухания люминесценции для всех исследуемых кристаллов. Установлено, что релаксация возбужденного состояния  ${}^4\text{F}_{3/2}$  в кристалле  $\text{Ca}_9\text{Nd}(\text{VO}_4)_7$  происходит в режиме близком к сверхмиграционному [4, 9, 10].

2. Установлена принадлежность кристаллов двойных кальциевых ванадатов к слаботушащимся неодимсодержащим средам. Это обусловлено нарушением резонансного согласования энергий переходов с испусканием  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  и поглощением  ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  иона неодима в данных кристаллах [4, 9, 10].

3. Установлена природа параметра интенсивности Джадда-Оффельта  $\Omega_2$  и связанной с ним интенсивности «сверхчувствительного» в поглощении перехода  ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{G}_{5/2}$  для иона неодима в ряду исследуемых кристаллов кальциевых ванадатов. Определена зависимость параметра  $\Omega_2$  от состава кристалла: его изменение в ряду от иона иттрия иону к иону неодима и иону лантана для кристаллов типа  $\text{Ca}_9\text{Y/Ln}(\text{VO}_4)_7$  и от иона калия к иону лития в ряду кристаллов  $\text{Ca}_{10}\text{K/Li}(\text{VO}_4)_7$ . Показано, что значение  $\Omega_2$  и интенсивность линии перехода  ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{G}_{5/2}$  в основном определяются симметрией локального окружения иона неодима, а ковалентность связей ион неодима – лиганды не оказывает влияния на значения этих величин [1, 4, 15].

5. Впервые определены лазерно-спектроскопические свойства кристалла  $\text{Eu}^{3+}:\text{LiYF}_4$ . Определены спектры поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания. Впервые получена генерация на переходе  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_4$ , на длине волны 702 нм в лазере на кристалле  $\text{Eu}^{3+}(7,6 \text{ ат.}\%)\text{LiYF}_4$ . Максимальная выходная мощность составила 15 мВт при дифференциальном КПД около 5% [6, 17].

6. Впервые исследованы абсорбционно-люминесцентные характеристики кристалла  $\text{Tb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ . Определены спектры поперечного сечения поглощения и стимулированного испускания. Установлены причины, ограничивающие получение генерации на данном кристалле в видимом спектральном диапазоне [7, 18].

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

17

7. Впервые определены характеристики кристалла  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  как насыщающегося поглотителя для модуляции добротности в лазерах в видимой области спектра, и впервые был реализован режим модулированной добротности лазера на кристалле  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$  на длинах волн 523 нм, 607 нм и 640 нм [5, 11, 16].

## Рекомендации по практическому использованию результатов

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что на основе кристаллов двойных кальциевых ванадатов предложены новые активные среды для лазеров, излучающих в спектральной области 1 мкм, которые могут представлять интерес для разработки лазеров пикосекундной длительности. Реализация лазера на кристалле  $\text{Eu}^{3+}(7,6 \text{ ат\%}):\text{LiYF}_4$  на длине волны 702 нм позволила расширить ряд кристаллов для непосредственной генерации излучения в видимой области спектра. В результате проведенных исследований был продемонстрирован потенциал кристалла  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  как пассивного модулятора для лазеров видимого спектрального диапазона.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре лазерной техники и технологии приборостроительного факультета БНТУ, а также на кафедре информационных систем и автоматизации производства ВГТУ. Полученные результаты были использованы при разработке и оптимизации технологии выращивания кристаллов в Институте монокристаллов Национальной Академии наук Украины и на НП ООО «Соликс» (Минск, Беларусь).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

*Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь*

1. Growth, spectroscopic and thermal properties of Nd-doped disordered  $\text{Ca}_9(\text{La/Y})(\text{VO}_4)_7$  and  $\text{Ca}_{10}(\text{Li/K})(\text{VO}_4)_7$  crystals / P.A. Loiko, A.S. Yasukevich, A.E. Gulevich, M.P. Demesh, M.B. Kosmyna, B.P. Nazarenko, V.M. Puzikov, A.N. Shekhovtsov, A.A. Kornienko, E.B. Dunina, N.V. Kuleshov, K.V. Yumashev // J. Lumin. – 2013. – Vol. 137. – P. 252–258.

2. Применение методов Фюхтбауэра-Ладенбурга и соответствия для определения спектров сечений стимулированного испускания неодимовых лазерных сред / М.П. Демеш, Н.В. Гусакова, А.С. Ясюкевич, Н.В. Кулешов, С.В. Григорьев, Ю.А. Крот, М.Б. Космына, А.Н. Шеховцов // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 211–219.

3.  $\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7:\text{Nd}^{3+}$ , a promising laser material: growth, structure and spectral characteristics of a Czochralski-grown single crystal / M.B. Kosmyna,

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

B.P. Nazarenko, V.M. Puzikov, A.N. Shekhovtsov, W. Paszkowicz, A. Behrooz, P. Romanowski, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, M.P. Demesh, W. Wierzchowski, K. Wieteska, C. Paulmann // *J. of Crystal Growth*. – 2016. – Vol. 445. – P. 101–107.

4. Growth and spectroscopic properties of  $\text{Ca}_9\text{Nd}(\text{VO}_4)_7$  single crystal / M.P. Demesh, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, M.B. Kosmyrna, P.V. Mateychenko, B.P. Nazarenko, A.N. Shekhovtsov, A.A. Kornienko, E.B. Dunina, V.A. Orlovich, I.A. Khodasevich, W. Paszkowicz, A. Behrooz // *Opt. Mat.* – 2016. – Vol. 60. – P. 387–393.

5. Passively Q-switched Pr:YLF laser with a  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  saturable absorber / M. Demesh, D.-T. Marzahl, A. Yasukevich, V. Kisel, G. Huber, N. Kuleshov, C. Kränkel // *Opt. Lett.* – 2017. – Vol. 42. – P. 4687–4690.

6. Spectroscopic properties and continuous-wave deep-red laser operation of  $\text{Eu}^{3+}$ -doped  $\text{LiYF}_4$  / M. Demesh, A. Yasukevich, V. Kisel, E. Dunina, A. Kornienko, V. Dashkevich, V. Orlovich, E. Castellano-Hernández, C. Kränkel, N. Kuleshov // *Opt. Lett.* – 2018. – Vol. 43. – P. 2364–2367.

7. Cross sections and transition intensities of  $\text{Tb}^{3+}$  in  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  / M. Demesh, A. Mudryi, A. Pavlyuk, E. Castellano-Hernández, C. Kränkel, N. Kuleshov // *OSA Contin.* – 2019. – Vol. 2, № 4. – P. 1378–1384.

## *Статьи в сборниках материалов научных конференций*

8. Growth and Characterization of Pure and Yb-Doped  $\text{Ca}_9\text{Y}(\text{VO}_4)_7$  Single Crystals / M.B. Kosmyrna, P.V. Mateychenko, B.P. Nazarenko, V.M. Puzikov, A.N. Shekhovtsov, W. Paszkowicz, O. Ermakova, P. Pomanowski, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, V.E. Kisel, A.E. Gulevich, M.P. Demesh // *International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering OMEE-2012 : proceedings, Lviv, Ukraine, September 3–7, 2012 / Lviv, 2012.* – P. 19–20.

9. Калибровка функции коэффициента пропускания люминесцентной установки / М.П. Демеш, Н.В. Гусакова, А.С. Ясюкевич, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов, С.В. Курильчик, А.С. Руденков, А.М. Ивашко // *Приборостроение 2014 : материалы 7-ой Международной научно-технической конференции, Минск, 19–21 ноября 2014 / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2014. – С. 284–285.*

10. Spectroscopic properties of  $\text{Ca}_9\text{Nd}(\text{VO}_4)_7$  single crystal / M.P. Demesh, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, A.N. Shekhovtsov // *Физика конденсированного состояния : материалы XXIII международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 16 апреля 2015 / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: В.Г. Барсуков [и др.]. – Гродно, 2015. – С. 3–5.*

11.  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$  лазер с диодной накачкой / М.П. Демеш, Н.В. Гусакова, В.Э. Кисель, А.С. Ясюкевич, Н.В. Кулешов // *Приборостроение 2016 : материалы 9-ой Международной научно-технической конференции, Минск, 23–25 ноября*

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

19

2016 / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2016 – С. 170–171.

12. Passively Q-switched, visible Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> laser operation with Co<sup>2+</sup>:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> saturable absorbers / D.-T. Marzahl, M.P. Demesh, A.S. Yasukevich, V.E. Kisel, N.V. Kuleshov, C. Kränkel // ALPS'17 : proceedings of the 6<sup>th</sup> Advanced Lasers and Photon Sources, Yokohama, Japan, April 18–21, 2017 / Laser society of Japan; ed. H. Yoneda [et al.]. – Yokohama, 2017. – ALPS6–3–1 – ALPS6–3–2.

## Тезисы

13. Выращивание и свойства монокристаллов Ca<sub>9</sub>La(VO<sub>4</sub>)<sub>7</sub>:Nd / А.Н. Шеховцов, М.Б. Космына, П.В. Матейченко, Б.П. Назаренко, В.М. Пузиков, П.А. Лойко, А.С. Ясюкевич, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов, К.В. Юмашев, А.Е. Гулевич, М.П. Демеш // Конференция стран СНГ по росту кристаллов (РКСНГ–2012) : тезисы докладов, Харьков, Украина, 1–5 октября 2012 / Харьков, 2012. – С. 9.

14. New Ca<sub>10</sub>Li(VO<sub>4</sub>)<sub>7</sub> laser host: growth and properties / A.N. Shekhovtsov, M.B. Kosmyra, V.M. Puzikov, B.N. Nazarenko, W. Paszkowicz, A. Behrooz, P. Romanowski, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, M.P. Demesh, W. Wierzchowski, K. Wieteska, C. Paulmann // 17<sup>th</sup> International Conference on Crystal Growth and Epitaxy : book of abstracts, Warsaw, Poland, August 11 – 16, 2013 / Warsaw, 2013. – P. 440.

15. Cross sections and branching ratios of Nd<sup>3+</sup> ions in binary calcium orthovanadate crystals / M.P. Demesh, N.V. Gusakova, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, A.N. Shekhovtsov, M.B. Kosmyra, P.V. Mateychenko, B.P. Nazarenko // XVI International Feofilov Symposium : book of abstracts, St. Petersburg, Russia, 9–13 November 2015 / ed.: V.N. Vasiliev [et. al.]. – St. Petersburg, 2015. – P. 202–204.

16. Q-switched Pr:YLF Laser with Co:MALO Saturable Absorber / M.P. Demesh, D.-T. Marzahl, A. Yasukevich, V. Kisel, G. Huber, N. Kuleshov, C. Kränkel // CLEO/Europe-EQEC : advance program, Munich, Germany, June 25–29, 2017 / European Physical Society; G. Cerullo, ed. – Munich, 2017. – CA-P.4.

17. Spectroscopy and laser operation of Eu<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> / M.P. Demesh, E. Castellano-Hernández, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.I. Dashkevich, V.A. Orlovich, C. Kränkel, N.V. Kuleshov // 18<sup>th</sup> International Conference on Laser Optics: technical program, St. Petersburg, Russia, June 04–08, 2018 / Fund for Laser Physics; A.A. Mak, ed. – St. Petersburg, 2018. – ThR1-39.

18. Spectroscopic properties of Tb<sup>3+</sup>:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> / M. Demesh, V. Kisel, N. Kuleshov, A. Mudryi, E. Castellano-Hernández, C. Kränkel, A. Pavlyuk // 8<sup>th</sup> EPS-QEOD Europhoton Conference : technical digest Barcelona, Spain, September 02–07, 2018 / European Physical Society; M. Ebrahim-Zadeh, ed. – Mulhouse, 2018. – ThP.42.

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

РЭЗЮМЭ

Дземеш Максім Пятровіч

СПЕКТРАЛЬНА-ЛЮМІНЕСЦЕНТНЫЯ ЁЛАСЦІВАСЦІ КРЫШТАЛЯЎ  
ВАНАДАТАЎ, ВАЛЬФРАМАТАЎ І ФТАРЫДАЎ З ТРОХВАЛЕНТНЫМІ  
ІЁНАМІ НЕАДЫМУ, ТЭРБІЮ І ЭЎРОПІЮ ЯК АКТЫЎНЫХ ЛАЗЕРНЫХ  
АСЯРОДДЗЯЎ

**Ключавыя словы:** неадым, еўропій, тэрбій, кобальт, празеадым, спектральна-люмінесцэнтныя ёласцівасці, лазерная генерацыя, пасіўная мадуляцыя дабротнасці.

**Мэта работы:** знаходжанне і даследаванне спектраскапічных характарыстык крышталяў ванадатаў, актываваных іёнамі  $\text{Nd}^{3+}$ , фтарыдаў з іёнамі  $\text{Eu}^{3+}$  і вальфраматаў з іёнамі  $\text{Tb}^{3+}$ , як актыўных матэрыялаў цвёрдацельных лазераў і нелінейных спектраскапічных уласцівасцяў крышталю шпінелі з іёнамі  $\text{Co}^{2+}$  як пасіўных мадулятараў лазераў бачнага дыяпазону.

**Метады даследавання:** эксперыментальныя метады даследавання спектраскапічных уласцівасцяў і генерацыйных характарыстык новых лазерных асяроддзяў.

**Выкарыстаная апаратура:** стандартнае спектраметрычнае і фотапрыёмнае абсталяванне; лабараторныя ўстаноўкі для макетавання цвёрдацельных лазераў.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** устаноўлены спектральна-люмінесцэнтныя ёласцівасці даследаваных матэрыялаў: знойдзены спектры папярочных сячэнняў паглынання і стымуляванага выпраменьвання, даследаваны кінетыкі люмінесценцыі ўзбуджаных станаў актыўных іёнаў. Пры выкарыстанні крышталю  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO})_7$  пры дыёднай напампоўцы ўпершыню рэалізавана лазерная генерацыя і вызначаны генерацыйныя характарыстыкі ў імпульсна-перыядычным рэжыме. Упершыню атрымана бесперапынная генерацыя на крышталі  $\text{Eu}^{3+}:\text{LiYF}_4$  на даўжыні хвалі 702 нм. Для крышталю  $\text{Tb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  прапанавана гіпотэза аб прычынах, якія падаўляюць генерацыю ў бачнай вобласці спектру. Пры выкарыстанні крышталю  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  упершыню рэалізаваны рэжым пасіўнай мадуляцыі дабротнасці  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}$  лазера.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення:** Атрыманыя вынікі выкарыстоўваюцца ў навуковых і вытворчых арганізацыях Рэспублікі Беларусь і ўкаранены ў навучальны працэс.

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

РЕЗЮМЕ

Демеш Максим Петрович

## СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ВАНАДАТОВ, ВОЛЬФРАМАТОВ И ФТОРИДОВ С ТРЕХВАЛЕНТНЫМИ ИОНАМИ НЕОДИМА, ТЕРБИЯ И ЕВРОПИЯ КАК АКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СРЕД

**Ключевые слова:** неодим, европий, тербий, кобальт, празеодим, спектрально-люминесцентные свойства, лазерная генерация, пассивная модуляция добротности.

**Цель работы:** определение и исследование спектроскопических характеристик кристаллов ванадатов, активированных ионами  $\text{Nd}^{3+}$ , фторидов с ионами  $\text{Eu}^{3+}$  и вольфраматов с ионами  $\text{Tb}^{3+}$ , как активных материалов твердотельных лазеров и нелинейных спектроскопических свойств кристалла шпинели с ионами  $\text{Co}^{2+}$  как пассивных модуляторов лазеров видимого диапазона.

**Методы исследования:** экспериментальные методы исследования спектроскопических свойств и генерационных характеристик новых лазерных сред.

**Использованная аппаратура:** стандартное спектрометрическое и фотоприемное оборудование; лабораторные установки для макетирования твердотельных лазеров.

**Полученные результаты и их новизна:** определены спектрально-люминесцентные свойства исследованных материалов: определены спектры поперечных сечений поглощения, стимулированного испускания, исследованы кинетики люминесценции возбужденных состояний активных ионов. При использовании кристалла  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$  при накачке диодным лазером впервые реализована лазерная генерация и определены генерационные характеристики в импульсно-периодическом режиме. Впервые получена непрерывная генерация на кристалле  $\text{Eu}^{3+}:\text{LiYF}_4$  на длине волны 702 нм. Для кристалла  $\text{Tb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  выдвинута гипотеза о причинах подавляющих, генерацию в видимой области спектра в данном материале. При использовании кристалла  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  впервые реализован режим пассивной модуляции добротности работы  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$  лазера.

**Рекомендации по использованию и область применения:** Полученные результаты используются в научных и производственных организациях Республики Беларусь и внедрены в учебный процесс.

# (ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

22

## SUMMARY

Demesh Maksim Petrovich

### SPECTRAL AND LUMINESCENCE PROPERTIES OF VANADATE, TUNGSTATE AND FLUORIDE CRYSTALS WITH TRIVALENT NEODYMIUM, TERBIUM AND EUROPIUM IONS AS ACTIVE LASER MEDIA

**Keywords:** neodymium, europium, terbium, cobalt, praseodymium, spectral-luminescent properties, laser generation, passive Q-switching.

**The purpose of the research:** determination and study of the spectroscopic characteristics of vanadates with  $\text{Nd}^{3+}$  ions, fluorides with  $\text{Eu}^{3+}$  ions and tungstates with  $\text{Tb}^{3+}$  ions, as active media for solid-state lasers and nonlinear spectroscopic properties of a spinel crystal with  $\text{Co}^{2+}$  ions as a saturable absorber for visible Q-switched lasers.

**Methods of investigation:** the experimental investigation methods of spectroscopic properties and laser characteristics of new active media.

**Used equipment:** commonly used spectrometric and photodetector equipment; lab setups for the prototyping of solid-state lasers.

**Obtained results and their novelty:** The spectral and luminescent properties of the studied materials: absorption and stimulated emission cross section spectra were determined. The kinetics of luminescence decay of the excited states of active ions were studied. Using  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$  crystal under the laser diode pump, laser generation was realized for the first time and lasing characteristics were determined in a pulse-periodic mode. The continuous-wave laser operation of  $\text{Eu}^{3+}:\text{LiYF}_4$  crystal was demonstrated at wavelength at the wavelength of 702 nm for the first time. For the  $\text{Tb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  crystal, some reasons that suppress laser action in the visible spectral region were proposed. Using a  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  crystal, the passive Q-switching laser operation On the base of the  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$  was demonstrated for the first time.

**Recommendations for usage and field of applications:** The results of this research are used in the scientific and industrial organizations of the Republic of Belarus and have been implemented in the university studying courses.

