

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

УДК 539.182+535.33+548.0  
№ гос.регистрации 20081929  
Инв.№

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по научной  
работе



В.В.ПЯТОВ

" 11 " марта 2010 г.

## ОТЧЕТ

о научно-исследовательской работе

**Исследование природы полосы люминесценции в области 475 нм в ВКР  
лазерах с самопреобразованием частоты излучения**

*(заключительный)*

договор с БРФФИ № Ф08-145/609 от 01.04.2008 г.

Начальник НИС

  
С.А.Беликов

Научный руководитель НИР  
доктор физ.-мат. наук, профессор

  
А.А.Корниенко

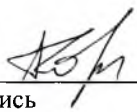
" 11 " марта 2010 г.

витебск 2010

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

(Теория. УО «Витебский государственный технологический университет»)

**Научный  
руководитель**  
доктор физ.-мат. наук,  
профессор, г.н.с

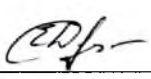
  
\_\_\_\_\_  
дата, подпись  
11.05.2010г

Корниенко Алексей  
Александрович

(Часть 1, все разделы)


### Исполнители:

кандидат физ.-мат. наук,  
доцент, с.н.с.

  
\_\_\_\_\_  
дата, подпись  
11.03.2010г


Дунина Елена  
Брониславовна  
(Часть 1, все разделы)

Младший научный  
сотрудник

  
\_\_\_\_\_  
дата, подпись  
11.03.2010г

Сапежинский Валерий  
Стефанович  
(Часть 1, все разделы)

Нормоконтролёр

  
\_\_\_\_\_  
дата, подпись  
11.07.2010г


Сапежинский Валерий  
Стефанович



## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

(Эксперимент. ГНУ «Институт физики им. Б.И.Степанова»)


Научный руководитель НИР  
ведущий научный сотрудник,  
доктор физ.-мат. наук

 12.03.2010  
подпись, дата

А.С.Грабчиков (реферат, введение,  
разделы 3, 4 и 5,  
заключение)


Исполнители

Младший научный сотрудник

 12.03.2010  
подпись, дата


И.А.Ходасевич (разделы 1, 3 и 4)

Младший научный сотрудник

 , 11.03.2010  
подпись, дата


А.А.Кононович (разделы 1, 2 и 5)

Аспирант

 , 12.03.2010  
подпись, дата

П.В.Шпак (разделы 1, 2, 3)

Нормоконтролер

 12.03.2010  
подпись, дата

В.Б.Ладю

## Реферат

отчет 111 с., 44 рис., 15 табл., 41 источник.

**Ключевые слова:** диодно накачиваемый лазер, вынужденное комбинационное рассеяние, KGW, Nd:KGW, голубое свечение, люминесценция, модель Джадда-Офельта, моделирование формы полосы люминесценции.

Объектом разработки и исследования является эффект появления полосы люминесценции в области 475 нм, возникающей в кристалле КГВ при возбуждении в нем непрерывного ВКР.

Цель работы – экспериментальное и теоретическое исследование природы возникновения люминесценции в области 475 нм

Основные результаты теоретического исследования:

а) Вычислены матричные элементы неприводимых тензоров ионов  $\text{Nd}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$  на волновых функциях в приближении квазисвободного иона.

б) Выполнен предварительный расчет времени жизни и коэффициентов ветвления люминесценции для иона  $\text{Nd}^{3+}$ .

в) На основе компьютерного моделирования формы полосы люминесценции получен однозначный вывод, что выдвинутая ранее в литературных источниках гипотеза о роли ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в происхождении голубой люминесценции – ошибочная

г) Решено уравнение Шредингера для колебаний с метастабильным положением равновесия и сделан вывод, что оптические фононы при определенных условиях могут создавать новую микромолекулярную структуру в кристалле.

Основные результаты экспериментального исследования:

а) создана экспериментальная установка для одновременного измерения лазерных потоков излучения, спектра, временных и поляризационных характеристик голубого свечения;

б) исследованы энергетические характеристики, спектральные и временные параметры лазерного и стоксового излучения созданного непрерывного Nd:KGW лазера с диодной накачкой;

в) исследованы спектральные, оптические и временные характеристики голубого свечения, возникающего при разных режимах работы лазера;

г) полученные при исследованиях результаты показывают, что механизм возникновения голубого свечения не связан с процессами апконверсии в

ионах неодима и, не является результатом антистоксовой люминесценции, а также нелинейных оптических преобразований, таких как генерация гармоники или когерентное суммирование. Голубое свечение – это обратимый процесс, характеризуемый собственным временем затухания – около 500 мксек, что существенно превышает характерные времена затухания лазерного и стоксова излучения и таким образом свидетельствует об особой природе эффекта. Предположительно эта природа обусловлена искажением кристаллической решетки кристалла KGW под воздействием лазерных полей высокой мощности и переносом энергии из лазерного излучения в возбужденное состояние при участии оптических фононов, создаваемых одновременно вследствие процесса комбинационного рассеяния.

Полученные результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. С фундаментальной точки зрения представляется важным создание полосы испускания излучения в первоначально прозрачной среде. С прикладной точки зрения значение имеет возможность управления характеристиками кристаллических сред посредством лазерного излучения, в том числе антистоксово преобразование инфракрасного излучения в видимый диапазон спектра. Определение возможностей подавления эффекта свечения будет способствовать устранению дополнительных потерь в полностью твердотельных лазерных системах, в том числе и с ВКР преобразованием частоты излучения.

Основные результаты опубликованы в 11 работах.

## СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения . . . . .	8
<b>ЧАСТЬ 1. ТЕОРИЯ</b> . . . . .	9
Введение . . . . .	9
<b>1</b> Вычислить матричные элементы тензоров для межмультиплетных переходов ионов $Nd^{3+}$ и $Tm^{3+}$ . . . . .	11
<b>1.1</b> Волновые функции и энергии $Nd^{3+}$ - и $Tm^{3+}$ -мультиплетов в приближении свободного иона . . . . .	11
<b>1.2</b> Матричные элементы неприводимых единичных тензорных операторов . . . . .	13
<b>2</b> Предварительный расчет времени жизни и коэффициентов ветвления люминесценции возбужденных уровней ионов $Nd^{3+}$ и $Tm^{3+}$ . . . . .	18
<b>2.1</b> Основные формулы теории интенсивностей . . . . .	18
<b>2.2</b> Вычисленные время жизни мультиплетов и коэффициенты ветвления иона $Nd^{3+}$ . . . . .	21
<b>3</b> Разработать основные принципы моделирования формы полосы люминесценции и выполнить предварительные расчеты для ионов $Nd^{3+}$ и $Tm^{3+}$ . . . . .	22
<b>4</b> Выполнить анализ абсорбционных переходов иона $Nd^{3+}$ в модели интенсивностей Джадда-Офельта . . . . .	27
<b>5</b> Построить графики распределения электронной плотности для высоколежащих мультиплетов иона $Nd^{3+}$ . . . . .	31
<b>6</b> Исследовать влияние возбужденных конфигураций на интенсивности абсорбционных переходов . . . . .	39
<b>6.1</b> Структурные данные . . . . .	39
<b>6.2</b> Абсорбционные переходы . . . . .	40
<b>7</b> Выполнить анализ люминесцентных переходов и расчет коэффициентов ветвления с различных возбужденных уровней . . . . .	45
<b>7.1</b> Обсуждение результатов расчета коэффициентов ветвления люминесценции . . . . .	49
<b>8</b> Исследовать возможные механизмы возбуждения голубой люминесценции. Изучение перспектив дальнейшего развития и практического использования полученных результатов . . . . .	50
<b>8.1</b> Классическое уравнение для вынужденных колебаний . . . . .	50
<b>8.2</b> Дополнительное метастабильное положение равновесия . . . . .	54
<b>8.3</b> Решение уравнения Шредингера для осциллятора с дополнительным метастабильным положением равновесия . . . . .	56
<b>8.4</b> Выводы . . . . .	64

	ЧАСТЬ 2. ЭКСПЕРИМЕНТ . . . . .	66
9	Создание экспериментальной установки, обеспечивающей одновременное измерение лазерных потоков излучения и спектра голубого свечения . . . . .	66
10	Непрерывный диодно накачиваемый лазер на основе кристалла калий гадолиниевого вольфрамата, активированного ионами неодима . . . . .	70
11	Исследование свойств голубого свечения . . . . .	76
11.1	Люминесценция кристалла KGW . . . . .	76
11.2	Исследование характеристик свечения в полностью допированном кристалле Nd:KGW . . . . .	78
11.3	Резонансное возбуждение голубого свечения с различных энергетических уровней иона $Nd^{3+}$ в кристалле KGW . . . . .	80
11.4	Спектральные свойства голубого свечения при разных режимах работы лазера . . . . .	84
11.5	Временные свойства голубого свечения . . . . .	92
12	Анализ возможных механизмов возбуждения голубого свечения . . . . .	98
13	Перспективы дальнейшего развития и практического использования полученных результатов . . . . .	102
	Заключение . . . . .	103
	Список использованных источников . . . . .	106

### Список использованных источников

1. Stimulated Raman scattering in Nd:KGW laser with diode pumping/ A.S. Grabtchikov [et al.]// J. Alloys Compd. –2000. – Vol. 300-301. – P. 300-302.
2. Continuous-wave Raman generation in a diode-pumped Nd<sup>3+</sup>:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>/ A.A. Demidovich [et al.]// Opt. Lett. – 2005. –Vol.30. – P. 1701-1703.
3. Pask, H.M. Continuous-wave, all-solid-state, intracavity Raman laser/ H.M. Pask// Opt. Lett. – 2005. – Vol.30. – P. 2454-2456.
4. Каминский, А.А. Многоуровневые функциональные схемы кристаллических лазеров/ А.А. Каминский, Б.М.Антипенко. – М., Наука, 1989. – 270 с.
5. Enhancement of blue upconversion mechanism in YLiF<sub>4</sub>:Yb:Tm:Nd crystals/L.C. Courrol [et al.]// J. Appl. Phys. – 2005. –Vol.98. – P. 1135041-1135043.
6. Spectroscopic characterization of Nd<sup>3+</sup>-doped KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single crystal grown by the top nucleated floating crystal method/ A. Brinier [et al.]// J. Lumin. – 1999. – Vol. 81. – P. 135-141.
7. Judd, B.R. Correlation crystal fields for lanthanide ions/ B.R. Judd// Phys. Rev. Lett.– 1977. – Vol.39, №4.– P. 242-244.
8. 140. Thorne, J.R.G. Evidence for a spin-correlated crystal field – two-photon spectroscopy of thulium III in the elpasolite Cs<sub>2</sub>NaYCl<sub>6</sub>:Tm<sup>3+</sup>/ J.R.G. Thorne, Q. Zeng, R.G. Denning// J. Phys.: Condens. Matter.–2001. – Vol.13, №33.– P. 7403-7419.
9. Faucher, M. D. Electronic spectra and configuration interaction of Tm<sup>3+</sup> in TmCl<sub>6</sub><sup>3-</sup>/ M.D. Faucher, P.A. Tanner, C.S.K. Mak// J. Phys. Chem. – 2004. – Vol. 108. – P. 5278-5287.
10. Evidence for strong interaction between the 5f<sup>2</sup> and 5f<sup>1</sup>7p<sup>1</sup> configurations of U<sup>4+</sup> in the octahedral sites of Cs<sub>2</sub>UBr<sub>6</sub> and Cs<sub>2</sub>ZrBr<sub>6</sub>/ M.D. Faucher [et al.]// Phys. Rev. B. – 1996. – Vol. 53, № 15. – P. 9501-9504.



- 11.Собельман, И.И. Введение в теорию атомных спектров/ И.И. Собельман. – М., Физматгиз, 1963. – 640 с.
- 12.Леушин, А.М. Таблицы функций, преобразующихся по неприводимым представлениям точечных групп/ А.М. Леушин – М.: Наука, 1968. – 142с.
- 13.Structural study of monoclinic  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  and effects of lanthanide substitution/ М.С. Pujol [et al.]// J. Appl. Cryst. – 2001. – Vol. 34. – P. 1-6.
- 14.Получение и люминесцентно-генерационные свойства  $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2 - \text{Nd}^{3+}$ / А.А. Каминский [и др.]// Изв. АН СССР. Неорган. материалы. – 1983. – Т. 19, №9. – С. 982-991.
- 15.Macalik, L. Polarized infrared and Raman spectra of  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  and their interpretation based on normal coordinate analysis/ L. Macalik, J. Hanuza, А.А. Kaminskii// J. Raman Spectrosc. – 2002. – Vol 33. – P. 92-103.
- 16.Субботин, К.А. Монокристаллы двойных вольфраматов  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$ ,  $\text{NaLa}(\text{WO}_4)_2$ , и  $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2$ , легированные ионами Yb и Er, как активные среды лазеров одно- и полуторамикронного диапазонов/ К.А. Субботин, Е.В. Жариков, В.А. Смирнов// Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 92, №4. – С. 654-664.
- 17.Growth, optical characterization, and laser operation of a stoichiometric crystal  $\text{KYb}(\text{WO}_4)_2$ / М.С. Pujoil [et al.]// Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 65. – P 165121-1– 165121-11.
- 18.Бокий, Г.Б. Рентгеноструктурный анализ/ Г.Б. Бокий, М.Ф. Порай-Кошиц. – Изд-во МГУ, 1964. – 490 с.
- 19.Спектры люминесценции европия/ М.И. Гайдук [и др.]. – М.: Наука, 1974. – 195 с.
- 20.Judd, B.R. Optical Absorption Intensities of Rare-Earth Ions/ B.R. Judd// Phys. Rev. – 1962. – Vol. 127, № 3. – P. 750-761.
- 21.Ofelt, G.S. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions/ G.S. Ofelt// J. Chem. Phys. – 1962. – Vol.37, №3. – P. 511-520.

- 22.Корниенко, А.А. Теория интенсивностей межмультиплетных электрических дипольных переходов в приближении сильного конфигурационного взаимодействия/ А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, В.Л. Янкевич// Опт. и спектр. – 1996. – Т.80, №6. – С. 951-955.
- 23.Dunina, E.B. Modified theory of f-f transition intensities and crystal field for systems with anomalously strong configuration interaction/ E.B. Dunina, A.A. Kornienko, L.A. Fomicheva// Cent. Eur. J. Phys.–2008. – Vol. 6, №3.– P. 407-414.
- 24.Давыдов, А.С. Физика твердого тела. Учебное пособие/ А.С. Давыдов. – М.: Наука, 1976г. – 640 с.
- 25.Урусов, В.С. ЭВМ - моделирование структуры и свойств минералов./ В.С. Урусов, Л.С. Дубровинский – Изд. МГУ, 1989. – 199 с.
- 26.Mochalov, I.V. Laser and nonlinear properties of the potassium gadolinium tungstates crystal  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$ -(KGW:Nd)/ I.V.Mochalov// Optical Engineering – 1997. – Vol.36, № 6. – P.1660-1669.
- 27.All solid-state diode-pumped Raman laser with self-frequency conversion/ A.S.Grabtchikov [et al.]// Appl. Phys. Lett. – 1999. – Vol.75, № 24. – P. 3742 - 3744.
- 28.Yellow-light generation of 5.7 W by intracavity doubling self-Raman laser of  $\text{YVO}_4/\text{Nd}:\text{YVO}_4$  composite/ H. Zhu [et al.]// Optics Lett. – 2009. – Vol. 34, № 18. – P. 2763-2765.
- 29.Spectroscopy of  $\text{Nd}^{3+}$ -doped  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  laser material, grown by the top nucleated floating crystal method/ F. Bourgeois [et al.]// Eur. Phys. J. AP. – 1999. – Vol.6, № 2. – P. 155-163.
- 30.Nd:KGW/KGW crystal: efficient medium for continuous-wave intracavity Raman generation/ V.A. Lisinetskii [et al.]// Appl. Phys. B. – 2007. – Vol.88. – P. 499–501.
- 31.Проявление конфигурационного взаимодействия в спектрах поглощения иона неодима/ А.А.Корниенко, [и др.]// Квантовая

электроника: материалы седьмой междунар. науч.-техн. конф. Минск, 13-16 октября 2008г./ Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский государственный университет, НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; редкол.: И.С. Манак (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – С. 42.

32. Исследование спектральной полосы голубой люминесценции в кристалле KGW/ А.А.Корниенко, [и др.]// Лазерная физика и оптические технологии: материалы седьмой междунар. научн. конф. Минск, 17-19 июня 2008 г.: в 3т/ Национальная Академия наук Беларуси, Институт физики имени Б.И.Степанова НАН Беларуси, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, Российский фонд фундаментальных исследований, Белорусское физическое общество. – Минск, 2008. – Т3. – С 54-57.

33. Федорова, А.С. Применение теории интенсивностей к биаксиальным кристаллам/ А.С.Федорова, А.А.Корниенко// XLI научно-техническая конференция преподавателей и студентов университета: тезисы докладов, Витебск, 2008г./ УО «ВГТУ» – Витебск, 2008. – С. 58-60.

34. Бруева, К.В. Решение уравнения Шредингера для осциллятора с дополнительным метастабильным положением равновесия/ К.В. Бруева, Е.Б. Дунина.// ВНКСФ-15: пятнадцатая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых: сборник тезисов докладов, Кемерово – Томск, 26 марта-2 апреля 2009г./ Ассоциация студентов-физиков и молодых учёных России, Кемеровский государственный университет, Томский государственный университет, Кемеровский научный центр СО РАН, Институт электрофизики УрО РАН, Администрация Кемеровской области; редкол.: А.Г. Арапов (отв. ред.) [и др.]. – Екатеринбург – Кемерово, изд: АСФ России, 2009. – С.

42-43.

35. Ларионова, Н.Н. Анализ оптического спектра иона  $Tm^{3+}$  в эльпасолитае в приближении сильного конфигурационного взаимодействия/ Н.Н. Ларионова, А.А. Корниенко.// ВНКСФ-15: пятнадцатая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых: сборник тезисов докладов, Кемерово – Томск, 26 марта-2 апреля 2009г./ Ассоциация студентов-физиков и молодых учёных России, Кемеровский государственный университет, Томский государственный университет, Кемеровский научный центр СО РАН, Институт электрофизики УрО РАН, Администрация Кемеровской области; редкол.: А.Г. Арапов (отв. ред.) [и др.]. – Екатеринбург – Кемерово, изд. АСФ России, 2009. – С. 130-131.
36. Бруева, К.В. Изучение движения частицы в потенциальном поле с дополнительным метастабильным положением равновесия/ К.В. Бруева, Е.Б. Дунина.// XLII научно-техническая конференция преподавателей и студентов университета: тезисы докладов, Витебск, апр. 2009г./ УО "ВГТУ". – Витебск, 2009. – С.36-37
37. Бруева, К. Компьютерное моделирование квантового осциллятора с дополнительным метастабильным положением равновесия/ К. Бруева, Е. Дунина, А. Корниенко.// ЛЮМКОС-2009: Люминесцентные процессы в конденсированных средах: тезисы докладов научно-технической конференции молодых ученых, Харьков, Украина, 17-20 ноября 2009г./ Институт сцинтилляционных материалов, НТК "Институт Монокристаллов Национальной Академии Наук Украины. – Харьков, 2009. – С. 67.
38. Фомичева, Л. Анализ штарковской структуры мультиплетов иона  $Pr^{3+}$  в кубическом эльпасолите  $Cs_2NaPrCl_6$ / Л. Фомичева, А. Корниенко, Е. Дунина.// ЛЮМКОС-2009: Люминесцентные процессы в конденсированных средах: тезисы докладов научно-технической

- конференции молодых ученых, Харьков, Украина, 17-20 ноября 2009г./  
Институт сцинтилляционных материалов, НТК "Институт  
Монокристаллов Национальной Академии Наук Украины. – Харьков,  
2009. – С. 80-81.
39. Ларионова, Н. Учет аномального конфигурационного взаимодействия  
при анализе оптического спектра иона  $Tm^{3+}$  в  $Cs_2NaTmF_6$ / Н.  
Ларионова, А. Корниенко// ЛЮМКОС-2009: Люминесцентные  
процессы в конденсированных средах: тезисы докладов научно-  
технической конференции молодых ученых, Харьков, Украина, 17-20  
ноября 2009г./ Институт сцинтилляционных материалов, НТК  
"Институт Монокристаллов Национальной Академии Наук Украины. –  
Харьков, 2009. – С. 72.
40. Временные характеристики синего излучения, наблюдаемого при  
непрерывной ВКР генерации в диодно-накачиваемом композитном  
 $Nd:KGW/KGW$  лазере/ И.А. Ходасевич [и др.]// Седьмой белорусско-  
российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их  
основе»: сборник статей, Минск, 1-5 июня 2009 г./ Национальная  
академия наук Беларуси, Белорусский республиканский фонд  
фундаментальных исследований, Институт физики им. Б. И. Степанова  
НАН Беларуси, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,  
Белорусский национальный технический университет, редкол.: В.З.  
Зубелевич [и др.]. – Минск, Институт физики им. Б. И. Степанова НАН  
Беларуси, 2009. – С. 186 – 189.
41. Фомичева, Л.А. Влияние конфигурационного взаимодействия на  
расщепление мультиплетов в молекулярных комплексах  $TmF_6^{3-}$  и  
 $TmCl_6^{3-}$ /Л.А.Фомичева, А.А.Корниенко, Е.Б.Дунина// ЖПС.- 2010.-  
Т.77, №2.- С. 173-179

