

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Витебский государственный технологический
университет»
УО «ВГТУ»

УДК 548

Рег. № 20163061



«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной работе

Е.В.Ванкевич

“ ___ ” декабря 2020 г.

О Т Ч Е Т

О научно-исследовательской работе

***Новые возможности спектроскопических методов исследования
электронного строения материалов с наноструктурами, активированными
редкоземельными ионами***

*по заданию «Фотоника, опто- и микроэлектроника 1.2.03»
подпрограммы «Фотоника» ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника»*

(Заключительный)

Научный руководитель

Начальник НИЧ

А.А.Корниенко

С.А.Беликов

Витебск, 2020г.

Библиотека ВГТУ



СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель

доктор физ.-мат. наук,
профессор, г.н.с

14.12.20

дата, подпись

Корниенко Алексей
Александрович
(Введение, заключение
Выводы по разделам 1–5)

Исполнители:

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

14.12.20

дата, подпись

Дунина Елена
Брониславовна
(Раздел 1-5)

кандидат физ.-мат. наук,
с.н.с.

14.12.20

дата, подпись

Фомичёва Людмила
Александровна
(Раздел 1-5)

научный сотрудник

14.12.20

дата, подпись

Лапко Максим
Леонидович
(Раздел 5)

Нормоконтролёр

14.12.20

дата, подпись

Куксевич Виталий
Федорович

РЕФЕРАТ

Отчет 181с., 1 кн., 8 рис., 80 табл., 101 источн.

ПРАЗЕОДИМ, НЕОДИМ, ЕВРОПИЙ, САМАРИЙ, ГОЛЬМИЙ, ТУЛИЙ, ЭРБИЙ, ДИСПОЗИЙ, BaY_2F_8 , ЛАЗЕРНЫЕ СТЕКЛА, $Lu_3Al_5O_{12}$, $Sr_{1.5}Ca_{0.5}SiO_4$, $Sr_{1.5}Ca_{0.5}TiO_3$, $KLu(WO_4)_2$, $KY(WO_4)_2$, YVO_4 , K_2YF_5 , Ba_2YCl_7 , $MgWO_4$, $YAl_3(BO_3)_4$, $Ca(Gd,Lu)AlO_4$, $YAl_3(BO_3)_4$, $LiNbO_3$, ИНТЕНСИВНОСТИ АБСОРБЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ, КОНФИГУРАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Объектом исследования являются лазерные материалы, активированные ионами празеодима, неодима, европия, самария, гольмия, тулия, эрбия, диспрозия.

Цель работы – работы исследовать влияние конфигурационного взаимодействия на интенсивности межмультиплетных электрических дипольных переходов и штарковское расщепление мультиплетов с точки зрения электронного строения состояний; разработать новые варианты теории интенсивностей и теории кристаллического поля, позволяющие при обработке экспериментальных результатов получить новую информацию об электронном строении и тем самым расширяющие возможности оптической спектроскопии.

Впервые обнаружено, что теория Джадда-Офельта не применима для описания интенсивностей полос поглощения иона тулия в теллуридном стекле.

На примере мультиплетов 5S_2 и 5F_4 иона Ho^{3+} в монокристаллах $KLu(WO_4)_2$ и $KY(WO_4)_2$ получено подтверждение ранее выдвинутой гипотезы о том, что степень влияния возбужденных конфигураций определяется не только величиной энергетического зазора до них, но и спецификой пространственного распределения электронной плотности в мультиплетах.

Вычислены волновые функции мультиплетов ионов Pr^{3+} , Tm^{3+} , Er^{3+} , Nd^{3+} . На основе этих функций выполнен предварительный анализ влияния конфигурационного взаимодействия на мультиплеты.

Выполнено описание штарковского расщепления мультиплетов иона Eu^{3+} в монокристалле двойных вольфраматов $KYb(WO_4)_2$ в приближении аномально сильного конфигурационного взаимодействия, применение которого дало возможность из данных по оптическим спектрам получить информацию о параметрах нечетного кристаллического поля и параметрах ковалентности. Это существенно расширяет возможности оптической спектроскопии по исследованию электронного строения оптических центров лазерных кристаллов.

Установлено, что из-за сильного спин-орбитального взаимодействия волновые функции редкоземельных ионов представляют собой многокомпонентные суперпозиции из "чистых" мультиплетов $^{2S+1}L_J$ с разными значениями S , L и одинаковыми значениями момента J . По этой причине влияние конфигурационного взаимодействия зависит не только от энергетического зазора до возбужденных конфигураций, но и от наличия компонент $^{2S+1}L_J$ с большими энергиями. Присутствие таких компонент обеспечивает сильное влияние конфигурационного взаимодействия даже на глубоколежащие уровни. Выполненные расчеты полностью подтверждают эту закономерность.

Установлено для монокристалла $Tm^{3+}:Lu_3Al_5O_{12}$, что мультиплеты 3H_6 , 3F_4 , 3H_4 образуют трехуровневую систему приблизительно с эквидистантным расположением, для которой может реализоваться резонансное двухфотонное поглощение.

Внедрение некоторых результатов в учебный процесс подтверждается тремя актами внедрения.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 <i>ВЛИЯНИЕ СПЕЦИФИКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ МАТЕРИАЛОВ С НАНОСТРУКТУРАМИ, АКТИВИРОВАННЫМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ</i>	9
1.1 Изучение влияния специфики пространственного распределения электронной плотности на интенсивности спектров поглощения материалов с наноструктурами, активированными ионами празеодима	11
1.1.1 Реализация процедуры минимизации функции многих переменных по методу Монте-Карло в среде «MAPLE»	11
1.1.2 Основные формулы теории интенсивностей	13
1.1.3 Влияния специфики пространственного распределения электронной плотности на интенсивности спектров поглощения оксидных фосфоров, активированными ионами празеодима	17
1.2 Влияние специфики пространственного распределения электронной плотности на люминесцентные характеристики материалов с наноструктурами, активированными ионами тулия	21
1.2.1 Реализация процедуры минимизации функции многих переменных по методу покоординатного спуска в среде «MAPLE»	21
1.2.2 Влияние специфики пространственного распределения электронной плотности на люминесцентные характеристики теллуридных стекол, активированными ионами тулия	24
1.3 Влияние специфики пространственного распределения электронной плотности на расщепление мультиплетов иона гольмия в наноструктурах двойных вольфраматов	26
1.3.1 Предварительный анализ электронного строения мультиплетов иона Ho^{3+}	27
1.3.2 Влияние специфики пространственного распределения электронной плотности на штарковское расщепление мультиплетов иона Ho^{3+}	33
1.4 Влияние специфики пространственного распределения электронной плотности на интенсивности спектров поглощения иона гольмия в наноструктурах лазерных материалов	47
Выводы по разделу 1	50
2 <i>ПРОЯВЛЕНИЕ МЕЖКОНФИГУРАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРАХ МАТЕРИАЛОВ С НАНОСТРУКТУРАМИ, АКТИВИРОВАННЫМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ</i>	53
2.1 Проявление межконфигурационного взаимодействия в интенсивностях полос поглощения наноструктур лазерных стекол, активированных ионами эрбия	55

2.1.1	Функции ионов эрбия и тулия и анализ механизмов конфигурационного взаимодействия	55
2.1.2	Влияние конфигурационного взаимодействия на интенсивности полос поглощения иона эрбия в боро-теллуридных стеклах	64
2.2	Проявление межконфигурационного взаимодействия в интенсивностях полос поглощения наноструктур лазерных материалов, активированных ионами неодима.....	68
2.2.1	Функции иона неодима и предварительный анализ механизмов конфигурационного взаимодействия	68
2.2.2	Влияние конфигурационного взаимодействия на интенсивности полос поглощения иона неодима в флюоро-фосфатных стеклах	70
2.2.3	Влияние конфигурационного взаимодействия на интенсивности полос поглощения иона неодима в магний-фосфатных стеклах	71
2.3	Проявление межконфигурационного взаимодействия в кристаллическом расщеплении мультиплетов наноструктур двойных вольфраматов, активированных ионами европия.....	75
2.4	Проявление межконфигурационного взаимодействия в интенсивностях полос поглощения наноструктур стекол и монокристаллов, активированных ионами самария.....	79
2.4.1	Влияние конфигурационного взаимодействия на интенсивности полос поглощения иона самария в гекса-алюминатных моно кристаллах	79
2.4.2	Проявление межконфигурационного взаимодействия в интенсивностях полос поглощения боро-теллуридо-фосфатных стеклах, активированных ионами самария.....	81
2.4.3	Проявление межконфигурационного взаимодействия в интенсивностях полос поглощения переходов иона Sm^{3+} в монокристалле Sc_2O_3	82
	Выводы по разделу 2	85
3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЖКОНФИГУРАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПО ОПТИЧЕСКИМ СПЕКТРАМ МАТЕРИАЛОВ С НАНОСТРУКТУРАМИ, АКТИВИРОВАННЫМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ		87
3.1	Определение параметров межконфигурационного взаимодействия иона эрбия по интенсивностям полос поглощения во фторидном кристалле	88
3.1.1	Влияние межконфигурационного взаимодействия на интенсивности полос поглощения иона эрбия в монокристалле K_2YF_5	88
3.1.2	Описание сил осцилляторов абсорбционных переходов иона эрбия в кристалле Ba_2YCl_5 с учетом конфигурационного взаимодействия	91
3.2	Определение параметров межконфигурационного взаимодействия иона диспрозия по интенсивностям полос поглощения в оксидных лазерных материалах	94
3.3	Определение параметров межконфигурационного взаимодействия иона тулия по	

оптическим спектрам оксидного низкосимметричного кристалла.....	98
3.4 Определение параметров межконфигурационного взаимодействия иона тербия по оптическим спектрам оксидного кристалла.....	104
Выводы по разделу 3	111
4 АНОМАЛЬНО СИЛЬНОЕ КОНФИГУРАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНОВ-АКТИВАТОРОВ НАНОСТРУКТУР ЛАЗЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВОЗБУЖДЕННЫМИ КОНФИГУРАЦИЯМИ.....	115
4.1 Влияние конфигурационного взаимодействия на интенсивности абсорбционных переходов и время жизни метастабильного уровня иона диспрозия в цинк-боратных стеклах.....	117
4.2 Наиболее адекватное приближение для описания интенсивностей абсорбционных переходов $BaY_2F_8:Pr^{3+}$ с учетом конфигурационного взаимодействия.....	122
4.3 Описание интенсивностей полос поглощения с учетом конфигурационного взаимодействия одноосных алюминатов, активированных ионами тулия и гольмия.....	125
4.4 Применение приближения аномально сильного конфигурационного взаимодействия для описания штарковского расщепления мультиплетов иона тербия в низкосимметричном оксидном кристалле	130
Выводы по разделу 4	137
5 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО СТРОЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С НАНОСТРУКТУРАМИ, АКТИВИРОВАННЫМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ, ПО ИХ ОПТИЧЕСКИМ СПЕКТРАМ.....	139
5.1 Проблемы описания интенсивностей полос поглощения иона празеодима в идий-фторидном лазерном стекле.....	141
5.2 Элементы теории резонансного двух фотонного поглощения в трех уровневой системе	145
5.3 Экспериментальные свидетельства двухфотонного резонансного поглощения ионов тулия в лазерных материалах.....	150
5.4 Экспериментальные свидетельства двухфотонного резонансного поглощения ионов эрбия в лазерных материалах.....	155
Выводы по разделу 5	160
Заключение.....	162
Список использованных источников.....	166

Список использованных источников

1. Judd, B.R. Optical absorption intensities of rare-earth ions / B.R. Judd // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 127, № 3. – P. 750-761.
2. Ofelt, G.S. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions / G.S. Ofelt // J. Chem. Phys. – 1962. – Vol.37, №3. – P. 511-520.
3. Dunina, E.B. Influence of Excited Configurations on the Intensities of Electric_Dipole Transitions of Rare_Earth Ions / E. B. Dunina and A. A. Kornienko // Optics and Spectroscopy. – 2014. – Vol. 116, No. 5. – P. 706–711.
4. 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.
5. Vidyadharan, V. Judd-Ofelt analysis of Pr³⁺ ions in Sr_{1.5}Ca_{0.5}SiO₄ and Sr_{0.5}Ca_{0.5}TiO₃ host matrices / V.Vidyadharan, S.Gopi, R.Mohan P, V.Thomas, C.Joseph N.V.Unnikrishnan, P.R.Biju // Optical Materials. – 2016. – Vol. 51. – P.62-69
6. Study of optical absorption, visible emission and NIR–vis luminescence spectra of Tm³⁺/Yb³⁺, Ho³⁺/Yb³⁺ and Tm³⁺/Ho³⁺/Yb³⁺ doped tellurite glasses / M. Seshadri, L.C.Barbosa, C.M.B.Cordeiro, M.Radha, F.A.Sigoli, Y.C.Ratnakaram // J.Lumin. – 2015. – Vol. 166. – P. 8-16.
7. Measurement and crystal field analysis of energy levels of Ho³⁺ and Er in KGd(WO₄)₂ single crystal / M.C. Pujol, C. Cascales, M. Rico, J. Massons, F. Diaz, P. Porcher, C. Zaldo // Journal of Alloys and Compounds. – 2001. – Vol. 323–324. – P. 321–325.

8. 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.
9. Kornienko, A.A. Determination of Odd_Symmetry Crystal_Field Parameters from Optical Spectra / A. A. Kornienko, E. B. Dunina, and L. A. Fomicheva // Optics and Spectroscopy. – 2014. – Vol. 116, No. 5. – P. 683–690.
10. Фомичева, Л.А. Описание штарковской структуры мультиплетов иона Eu^{3+} в $\text{Rb}_2\text{NaEuF}_6$ и $\text{Cs}_2\text{K}_2\text{YF}_6:\text{Eu}^{3+}$ в приближении аномально сильного конфигурационного взаимодействия. / Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // Весці БДПУ, N 2(88), 2016. - С. 5-11.
11. Надежная, Н.Л. Теория автоматического управления: методические указания к выполнению курсового проекта для студентов 1-53 01 01-05 «автоматизация технологических процессов и производств (легкая промышленность)». / Н.Л. Надежная, А.А. Корниенко, А.С. Соколова. // Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2016. 44 с.
12. Высшая математика. Функции нескольких переменных. Интегральное исчисление функции одной переменной: методические указания к практическим занятиям для студентов второго курса заочной формы обучения. / Джежора А.А., Дунина Е.Б., Никонова Т.В., Рубаник О.Е., Статковский Н.С. // Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2016. 66 с.
13. Влияние специфики пространственного распределения электронной плотности на люминесцентные характеристики материалов, активированных ионами тулия. / Янукович А.В., Фомичева Л.А., Корниенко А.А., Прусова И.В. // Материалы докладов 49 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. В 2 т. Т 2 / УО «ВГТУ». — Витебск, 2016. — 337 с. С.17

14. Анализ кристаллического расщепления мультиплетов иона Pr^{3+} в $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ с учётом влияния возбуждённых конфигураций. / Фомичёва Л.А., Корниенко А.А., Дунина Е.Б., Прусова И.В. // Сб. докл. Междун. научн. конфер. “Актуальные проблемы физики твёрдого тела”. 22-25 ноября 2016 г., Минск, “Ковчег”, 2016, т. 2, с. 255-257.
15. Фомичева, Л.А. Математическое моделирование оптических свойств кристаллических систем, легированных элементами с незаполненной f-оболочкой. / Л.А. Фомичева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко. // XII Белорусская математическая конференция: материалы Междунар. науч. конф. Минск, 5–10 сентября 2016 г. В 5 ч. / Ред. С.Г. Красовский. – Часть 3. – Мн.: Институт математики НАН Беларуси, 2016. – 110с. С. 69.
16. Judd–Ofelt analysis and stimulated-emission cross-sections for highly doped (38 at%) Er:YSGG laser crystal. / P.A. Loiko, E.A. Arbabzadah, M.J. Damzen, X. Mateos, E.B. Dunina, A.A. Kornienko, A.S. Yasukevich, N.A. Skoptsov, K.V. Yumashev. // Journal of Luminescence 171 (2016) 226–233.
17. 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. Kosmyna, 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. // Optical Materials 60 (2016) 387-393. Импакт-фактор 2.183.
18. Определение параметров ковалентности на основе экспериментальных штарковских уровней иона Tm^{3+} в кристаллической системе $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$. / Фомичева Л.А., Корниенко А.А., Дунина Е.Б., Прусова И.В. // Сборник трудов IX Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2016». Санкт-Петербург. 17-21 октября 2016 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: Университет ИТМО, 2016. – 537 с. С.99
19. Dunina, E.B. Description of intensity of absorption bands of Pr^{3+} ion in phosphate glass. Dunina E.B., Lepeshkina Yu.S., Kornienko A.A. //

- Современные тенденции развития науки и производства: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции (27 – 28 октября 2016 года), Том II – Кемерово: ЗапСибНЦ, 2016 – 570с. С. 567–569.
20. Моделирование интенсивностей полос абсорбционного спектра иона празеодима в оксидных люминофорах. / Шатера А.Н., Дунина Е.Б., Корниенко А.А., Прусова И.В. // Тезисы докладов 49 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». — Витебск, 2016. С. 109.
21. Дунина, Е.Б. Моделирование спектроскопических свойств ионов с $4f^2$ конфигурацией в стеклах. / Дунина Е.Б., Лепешкина Ю.С., Савочкина В.Г. // Материалы докладов 49 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. В 2 т. Т 1 / УО «ВГТУ». — Витебск, 2016. — 387 с. С. 274–276.
22. Judd–Ofelt analysis of spectroscopic properties of Tm^{3+} , Ho^{3+} doped $GdVO_4$ crystals / Yang Yanmin [et al.] // Opt. Mater. – 2007. – Vol. 29. – P. 1159-1165.
23. Efficient 1.54 μm laser property in near-stoichiometric $Er:LiNbO_3$ crystal / Y. Qian [et al.] // Optics & Laser Technology. – 2015. – Vol. 74. – P. 173-177
24. Mahraz, Z.A.S. Enhanced luminescence from silver nanoparticles integrated Er^{3+} -doped boro-tellurite glasses: Impact of annealing temperature / Z.A.S. Mahraz, M.R. Sahar, S.K. Ghoshal // J. Alloys Compd. – 2015. – Vol. 649 – P. 1102-1109.
25. Spectroscopic properties of highly Nd-doped lead phosphate glass / A.L.F. Novais [et al.] // J. Alloys Compd. – 2015. – Vol. 648. – P. 338-345.
26. Judd-Ofelt analysis of spectroscopic properties of Nd^{3+} -doped novel fluorophosphate glass / J.H. Choi [et al.] // J. Lumin.– 2005.– Vol.114.– P.167-177.
27. Europium doping in monoclinic $KYb(WO_4)_2$ crystal / P.A.Loiko [et al.] // J. Lumin.–2017.– Vol.183.– P. 217-225.

28. Optical properties of Sm^{3+} doped strontium hexa-aluminate single crystals // / C. Gheorghe [et al.] // J. Alloys Compd. – 2015. – Vol. 622 – P. 296-302.
29. Selvi, S. Structural and luminescence behavior of Sm^{3+} ions doped lead borotelluro-phosphate glasses / S. Selvi, K. Marimuthu, G. Muralidharan // J. Lumin. – 2015.– Vol.159.– P. 207-218.
30. Sm^{3+} -doped Sc_2O_3 polycrystalline ceramics: Spectroscopic investigation / C. Gheorghe [et al.] // J. Alloys Compd. – 2012. – Vol. 535 – P. 78-82.
31. Spectroscopic characteristics of Sm^{3+} -doped alkali fluorophosphate glasses / M. Jayasimhadri [et al.] // Spectrochim. Acta Part A. – 2006. – Vol. 64 – P. 39-944.
32. Judd-Ofelt modelling and stimulated-emission cross-sections for Tb^{3+} ions in monoclinic $\text{KYb}(\text{WO}_4)_2$ crystal / P. Loiko [et al.] // J. Lumin.– 2017.– Vol.190.– P. 37-44.
33. Spectroscopic investigation of $\text{Sm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ crystal / M.P. Demesh [et al.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83 – С. 480-481
34. Определение параметров ковалентности трехвалентного иона европия в двойных вольфраматах методами оптической спектроскопии/ Л.А. Фомичева [и др.]// Квантовая электроника: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 13-17 нояб. 2017г./ Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский государственный университет, НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-техническая ассоциация "Оптика и лазеры"; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: РИВШ, 2017. – С. 173-174..
35. Анализ конфигурационного взаимодействия с точки зрения электронного строения состояний редкоземельного иона / А.А. Корниенко [и др.]// Квантовая электроника: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Минск,

- 13-17 нояб. 2017г./ Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский государственный университет, НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-техническая ассоциация "Оптика и лазеры"; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: РИВШ, 2017. – С. 51-52.
36. Волновые функции ионов неодима и празеодима и анализ механизмов конфигурационного взаимодействия / А.А. Корниенко [и др.] // Материалы докладов 50-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной Году науки : в 2 т. / УО "ВГТУ". - Витебск, 2017. - Т. 2. - С. 21-23
37. Григорьева, М.В. Моделирование спектральных закономерностей лазерных сред, активированных редкоземельными ионами / М.В. Григорьева, Е.Б. Дунина // Материалы докладов 50-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной Году науки : в 2 т. / УО "ВГТУ". - Витебск, 2017. - Т. 2. - С. ??
38. Фомичева, Л.А. Учет аномально сильного конфигурационного взаимодействия при описании штарковской структуры мультиплетов иона Pr^{3+} в $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ // Л.А. Фомичева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // Фізика, електроніка, електротехніка: 2017, Суми, 17–21 квітня 2017 року.: Матеріали науково-технічної конференції / С.І. Проценко (відпов. за вип.). – Суми, Сумський державний університет, 2017. – С. 46
39. Высшая математика. Кратные интегралы. Дифференциальные уравнения. Ряды: методические указания к практическим занятиям для студентов второго курса заочной формы обучения. / Е.Б. Дунина [и др.] // Витебск, УО «ВГТУ», 2017. – 81с.
40. Loiko, P.A. Judd–Ofelt modeling, stimulated-emission cross-sections and non-radiative relaxation in $\text{Er}^{3+}:\text{K}_2\text{YF}_5$ crystals / P.A. Loiko, E.V. Vilejshikova,

- N.M. Khaidukov, M.N. Brekhovskikh, X. Mateos, M. Aguilo, K.V. Yumashev// J. Lumin. – 2016. – Vol. 180. – P. 103-110.
41. 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.
42. Dunina, E.B. Influence of excited configurations on the intensities of electric dipole transitions of rare earth ions / E.B. Dunina, A.A. Kornienko// Optics and Spectroscopy. – 2014. – Vol. 116, №5. – P. 706–711.
43. Riedener, T. Upconversion mechanism in Er^{3+} -doped Ba_2YCl_7 / T. Riedener, Ph. Egger, J. Hulliger, H.U. Gudel// Phys. Rev. – 1997. – Vol.56, №4. – P. 1800–1808.
44. Lakshminarayana, G. Effect of alkali/mixed alkali metal ions on the thermal and spectral characteristics of $\text{Dy}^{3+}:\text{B}_2\text{O}_3\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ glasses/ G. Lakshminarayana, S.O. Baki, A. Lira, U. Caldino, A.N. Meza-Rocha, I.V. Kityk, A.F. Abas, M.T. Alresheedi, M.A. Mahdi// J. Non-Crystalline Solids. – 2018. – Vol. 481. – P. 191-201.
45. Ходасевич, И.А. Ап-конверсия ик излучения в кристалле $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ на ионах эрбия и тулия в следовой концентрации: смена схем возбуждения и энергоперенос через кристаллическую решетку/ И.А. Ходасевич, А.А. Корниенко, П.П. Першукевич, В.А. Асеев, М.А. Ходасевич, А.С. Грабчиков// ЖПС. – 2017. – Т. 84, №6. – С. 905-914.
46. Demesh, M.P. Growth and spectroscopic properties of $\text{Sm}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ crystal/ M.P. Demesh, O.P. Dernovich, N.V. Gusakova, A.S. Yasukevich, A.A. Kornienko, E.B. Dunina, L.A. Fomicheva, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov// Opt. Mater. – 2018. – Vol.75 – P. 821-826.
47. Loiko, P. Spectroscopy of Tb^{3+} ions in monoclinic $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ crystal application of an intermediate configuration interaction theory/ P. Loiko,

- A. Volokitina, X. Mateos, E. Dunina, A. Kornienko, E. Vilejshikova, M. Aguilo, F. Diaz// Opt. Mater. – 2018. – Vol.78 – P. 495-501.
48. Дунина, Е.Б. Влияние конфигурационного взаимодействия редкоземельных ионов на интенсивности их межмультиплетных переходов/ Е.Б. Дунина, Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, М.В. Григорьева// ЖПС. – 2018. – Т. 85, №3. – С. 398-406.
49. Volokitina, A. $\text{Eu}^{3+}:\text{KY}(\text{MoO}_4)_2$: A novel anisotropic red-emitting material with a layered structure/ A. Volokitina, P. Loiko, E. Vilejshikova, X. Mateos, E. Dunina, A. Kornienko, N. Kuleshov, A. Pavlyuk// J. Alloys Compd.– 2018. – Vol.762 – P. 786-796.
50. Loiko, P. Monoclinic $\text{Tm}:\text{MgWO}_4$ crystal: Crystal-field analysis, tunable and vibronic laser demonstration/ P. Loiko, Y. Wang, J.M. Serres, X. Mateos, M. Aguilo, F. Díaz, L. Zhang, Z. Lin, H. Lin, G. Zhang, E. Vilejshikova, E. Dunina, A. Kornienko, L. Fomicheva, V. Petrov, U. Griebner, W. Chen// J. Alloys Compd.– 2018. – Vol.763 – P. 581-591.
51. Demesh, M. Spectroscopic properties and continuous-wave deep-red laser operation of Eu^{3+} -doped LiYF_4 /M. Demesh, A. Yasukevich, V. Kisel, E. Dunina, A. Kornienko, V. Dashkevich, V. Orlovich, E. Castellano-Hernandez, C. Krankel, N. Kuleshov// Optics Letters. – 2018. – Vol. 43, №. 10. – P. 2364-2367.
52. Кристаллографическая и кристаллохимическая База данных для минералов и их структурных аналогов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
http://database.iem.ac.ru/mincryst/rus/s_carta.php?HUANZALALITE+5245. –
Дата доступа: 29.05.2018.
53. Kornienko, A.A. Determination of Odd Symmetry Crystal Field Parameters from Optical Spectra/ A.A. Kornienko, E.B. Dunina, L.A. Fomicheva// Optics and Spectroscopy – 2014. – Vol.116, №5. – P. 683-690.

54. BenAmar, N. Optical spectroscopy and crystal field calculation of Tb^{3+} doped in $YAl_3(BO_3)_4$ single crystal/ N. BenAmar, M.A. Hassairi, M. Dammakn// J. Lumin. – 2016. – Vol. 173. – P. 223-230.
55. Fomicheva, L.A. Defining of the covalence parameters in $Cs_2NaYCl_6:Eu^{3+}$ and $Cs_2NaEuCl_6$ by the optical spectra// L.A. Fomicheva, A.A. Kornienko, E.B. Dunina/ Acta Physica Polonica. – 2018. – Vol.134, №2. – P. 473-477.
56. Корниенко, А.А. Проблемы моделирования интенсивностей полос поглощения иона Dy^{3+} в лазерных стеклах / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, Л.А. Фомичева, И.В. Прусова, И.В. Григорьева // Материалы докладов 51-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов: в 2 т. / УО "ВГТУ". – Витебск, 2018. – Т. 2. – С. 16–19.
57. Дунина, Е. Б. Влияние конфигурационного взаимодействия на интенсивностные характеристики фторидных лазерных материалов, активированных ионами эрбия/ Е.Б. Дунина, М.В. Григорьева, О.А. Шафоростова// Тезисы докладов 51 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ».- Витебск, 2018. – С. 170.
58. Дунина, Е. Б. Моделирование пространственного и радиального распределения электронной плотности иона Ho^{3+} в лазерных стеклах/ Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко, М.В. Григорьева, Л.Н. Васильева// Тезисы докладов 51 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ».- Витебск, 2018. – С. 171.
59. Надежная, Н.Л. Системы компьютерной графики: методические указания по выполнению курсовой работы/ Н.Л. Надежная, А.К. Гниденко, А.С. Соколова, Е.Б. Дунина. // – Витебск : УО «ВГТУ», 2018. – 37 с.
60. Kornienko, A.A. Electronic structure of multiplets and configuration interaction / A.A. Kornienko, E.B. Dunina, L.A Fomicheva //Book of Abstracts of the XVII International Feofilov Symposium on spectroscopy of crystals doped

with rare earth and transition metal ions (IFS2018). Ekaterinburg, Russia. September 23-28, 2018/ Ural Federal University, The Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Mikheev Institute of Metal Physics UB RAS. – Ural Federal University, 2018. – P. 116.

61. Lakshminarayana, G. Effect of alkali/mixed alkali metal ions on the thermal and spectral characteristics of $\text{Dy}^{3+}:\text{B}_2\text{O}_3\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ glasses / G. Lakshminarayana, S.O. Baki, A. Lira, U. Caldino, A.N. Meza-Rocha, I.V. Kityk, A.F. Abas, M.T. Alresheedi, M.A. Mahdi // *J. Non-Crystalline Solids*. – 2018. – Vol. 481. – P. 191-201.
62. Dunina, E.B. Influence of Excited Configurations on the Intensities of Electric Dipole Transitions of Rare Earth Ions / E. B. Dunina and A. A. Kornienko // *Optics and Spectroscopy*. – 2014. – Vol. 116, No. 5. – P. 706–711.
63. 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.
64. Дунина, Е.Б. Влияние конфигурационного взаимодействия редкоземельных ионов на интенсивности их межмультиплетных переходов / Е.Б. Дунина, Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, М.В. Григорьева // *ЖПС*. – Т. 85, №3. – С. 398 – 406.
65. Hakim, R. Growth, optical spectroscopy and Judd–Ofelt analysis of Pr-doped BaY_2F_8 monocrystals / R. Hakim, K.Damak, A.Toncelli, M.Fourati, R.Maalej // *J. Lumin.* – 2013. – Vol. 143. – P. 233-240.
66. Корниенко, А.А. Определение параметров кристаллического поля нечетной симметрии из оптических спектров/ А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, Л.А. Фомичева // *Оптика и спектроскопия*. – 2014. – Т.116, №5. – С. 739-746.

67. Ben Amar, N. Optical spectroscopy and crystalfield calculation of Tb^{3+} doped in $YAl_3(BO_3)_4$ single crystal / N. Ben Amar, M.A. Hassairi, M. Dammak // J. Lumin. – 2016. – Vol. 173. – P. 223-230.
68. Growth, spectroscopy and first laser operation of monoclinic $Ho^{3+}:MgWO_4$ crystal // L. Zhang, P. Loiko, J.M. Serres, E. Kifle, H. Lin, G. Zhang, E. Vilejshikova, E. Dunina, A. Kornienko, L. Fomicheva, U. Griebner, V. Petrov, Z. Lin, W. Chen, K. Subbotin, M. Aguiló, F. Díaz, X. Mateos/ J. Lumin – 2019. – Vol.213 – P. 316-325; **импакт-фактор 2.961**
69. Особенности вхождения редкоземельного активатора в кварцевые гелевые стекла, легированные Sm, Al и Ba/ Г.Е. Малашкевич, А.Н. Шимко, А.П. Ступак, И.В. Прусова, К.Н. Нищев, В.М. Кяшкин, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, А.В. Семченко, И.И. Сергеев// ЖПС. – 2019. – Т. 86, №4. – С. 523-529; **импакт-фактор 0.675**
70. Поперечные сечения, интенсивности переходов и лазерная генерация на переходе $3P_1 \rightarrow 3H_5$ в кристалле $LiY_0.3Lu_{0.7}F_4:Pr^{3+}$ / А.С. Низамутдинов, О.С. Морозов, С.Л. Кораблева, В.В. Семашко, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко, М.П. Демеш, Н.В. Гусакова, А.С. Ясюкевич, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов// ЖПС. – 2019. – Т. 86, №2. – С. 203-209; **импакт-фактор 0.675**
71. Тестова, А.Д. Моделирование влияния конфигурационного взаимодействия на интенсивностные характеристики поглощения и излучения иона диспрозия в боратных стеклах / А.Д. Тестова, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // Материалы докладов 52-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов: в 2 т. / УО "ВГТУ". – Витебск, 2019. – Т. 2. – С. 25–27.
72. Определение параметров пространственного распределения электронной плотности иона Tb^{3+} в $YAl_3(BO_3)_4$ оптическими методами / Л.А. Фомичева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко, А.С. Ткачев // Материалы докладов 52-й Международной научно-технической конференции

преподавателей и студентов: в 2 т. / УО "ВГТУ". – Витебск, 2019. – Т. 2. – С. 30–32.

73. Дунина, Е.Б. Решение алгебраических уравнений методами оптимизации/ Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко, Е.В. Клейменов// Тезисы докладов 52-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов/ УО "ВГТУ". – Витебск, 2019. – С. 182-183.
74. Корниенко, А.А. Взаимосогласованное описание сил осцилляторов абсорбционных переходов и времени жизни метастабильного уровня системы $BaY_2F_8:Pr^{3+}$ / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, Л.А. Фомичева // Тезисы докладов 52-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов/ УО "ВГТУ". – Витебск, 2019. – С. 184.
75. Дунина, Е.Б. Влияние конфигурационного взаимодействия на интенсивности полос поглощения гольмия в смешанных литий-фосфатных стеклах/ Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко, Л.А. Фомичева// Квантовая электроника: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18-22 нояб. 2019г./ Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский государственный университет, НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-техническая ассоциация "Оптика и лазеры"; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: РИВШ, 2019. – С. 94-95.
76. Фомичева, Л.А. Определение параметров ковалентности иона Ho^{3+} в $Y_3Al_5O_{12}$ /Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, // Квантовая электроника: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18-22 нояб. 2019г./ Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский государственный университет, НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, Институт

физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Научно-техническая ассоциация "Оптика и лазеры"; редкол.: М.М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: РИВШ, 2019. – С. 106.

77. Корниенко А.А. Наиболее адекватное приближение для описания интенсивностей абсорбционных переходов $\text{BaY}_2\text{F}_8:\text{Pr}^{3+}$ / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, Л.А. Фомичева // Оптика неоднородных структур: материалы Междунар. науч. конф., 28–29 мая 2019 г./ МГУ имени А.А. Кулешова. – Могилев, 2019. –С. 171–174.
78. Дунина, Е.Б. Определение параметров ковалентности для кристаллической системы $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Tb}^{3+}$ на основе экспериментальных данных по штарковской структуре/ Е.Б. Дунина, Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко // Оптика неоднородных структур: материалы Междунар. науч. конф., 28–29 мая 2019 г./ МГУ имени А.А. Кулешова. – Могилев, 2019. –С. 197–199.
79. Вагнер, О.А. Математика. Применение пакета Mathematica. В 2 ч. Ч. 1: Линейная алгебра. Аналитическая геометрия. Введение в математический анализ: пособие / О.А. Вагнер, Л.А. Фомичева. - Минск : БГУИР, 2019. - 180 с.
80. Orange emission in Pr^{3+} -doped fluoroindate glasses / D. Manzani [et al.] // Proc. SPIE. – 2012. –Vol.1. – P. 1-9.
81. Judd, B.R. Optical absorption intensities of rare-earth ions / B.R. Judd // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 127, № 3. – P. 750-761.
82. Ofelt, G.S. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions / G.S. Ofelt // J. Chem. Phys. – 1962. – Vol.37, №3. – P. 511-520.
83. Dunina, E.B. Influence of excited configurations on the intensities of electric dipole transitions of rare earth ions / E.B. Dunina, A.A. Kornienko // Optics and Spectroscopy. – 2014. – Vol. 116, No. 5. – P. 706-711.
84. 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.
85. Дунина, Е.Б. Влияние конфигурационного взаимодействия редкоземельных ионов на интенсивности их межмультиплетных переходов / Е.Б. Дунина, Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, М.В. Григорьева // ЖПС. – Т. 85, №3. – С. 398-406.
86. Growth, optical spectroscopy and Judd-Ofelt analysis of Pr-doped BaY₂F₈ monocrystals / R. Hakim [et al.] // J. Lumin. – 2013. – Vol. 143. – P. 233-240.
87. Emission properties of Tm³⁺-doped CaF₂, KY₃F₁₀, LiYF₄, LiLuF₄ and BaY₂F₈ crystals at 1.5 μm and 2.3 μm / P. Loiko [et al.]// J. Lumin. – 2020. – Vol.225. – P. 117279.
88. Spectroscopy and diode-pumped laser operation of transparent Tm:Lu₃Al₅O₁₂ ceramics produced by solid-state sintering/ Fangxin Yue [et al.] // Optics Express – 2020. – Vol. 28, Issue 19, P. 28399-28413.
89. Weber, M. J. Radiative and multiphonon relaxation of rare-earth ions in Y₂O₃ /M.J. Weber // Phys. Rev. – 1968. – Vol. 171, № 2. – P. 283-291.
90. Er:Lu₂O₃ – Laser-related spectroscopy/ Larry D. Merkle [et al.] // Opt. Mat. Expr. – 2013. – Vol. 3, № 19, P. 1992-2002.
91. Growth, spectroscopy and laser operation of monoclinic Nd:CsGd(MoO₄)₂ crystal with a layered structure / P. Loiko [et al.]// J. Lumin. – 2021. – Vol.231. – P. 117793.
92. Spectral-luminescence properties of oxyfluoride lead-silicate-germanate glass doped with Tm³⁺ ions / A.S. Yasukevich [et al.]// J. Lumin. – 2021. – Vol.229. – P. 117667.
93. Disordered Tm³⁺, Ho³⁺-codoped CNGG garnet crystal: Towards efficient laser materials for ultrashort pulse generation at ~2 μm / Zhongben Pan [et al.] // J. Alloy Compd. – 2021. – Vol. 853. – P.157100.

94. Корниенко, А.А. Причины сверхпоглощения в лютеций алюминиевом гранате, активированном ионами тулия / А.А. Корниенко, Л.А. Фомичева, Е.Б. Дунина // Материалы докладов 53 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». – Витебск, 2020. – 351с.- С.20–23.
95. Лапко, М.Л. Приложение для расчета параметров интенсивности лазерных материалов / М.Л. Лапко, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // Тезисы докладов 53 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». – Витебск, 2020. – 290с. – С. 175–176.
96. Фомичева, Л.А. Описание штарковской структуры мультиплетов иона Pr^{3+} в кристалле $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)$ / Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // Сборник трудов XII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2020». Санкт-Петербург. 19-23 октября 2020 г. / Под ред. проф. С.А. Козлова.– СПб: Университет ИТМО, 2020. – 418 с. – С. 77.
97. Лешко, В.В. Разработка и исследование системы обучения нейронной сети с подкреплением / В.В. Лешко, Е.Б. Дунина // Тезисы докладов 53 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». – Витебск, 2020. – 290с. – С. 176–177.
98. Синькевич, П.В., Разработка и исследование приложения для просмотра успеваемости учеников / П.В. Синькевич, Е.Б. Дунина, В.Е. Казаков // Тезисы докладов 53 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». – Витебск, 2020. – 290с. – С. 187.
99. Герасимов, Д.О. Разработка и исследование информационной системы классификации и распознавание образов / Д.О. Герасимов, Е.Б. Дунина // Тезисы докладов 53 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». – Витебск, 2020. – 290с. – С. 188.

100. Дунина, Е.Б. Искусственный интеллект: методические указания к практическим занятиям для студентов специальности 1-40 05 01-01 "Информационные системы и технологии (в проектировании и производстве)" дневной и заочной на базе ссуз форм обучения / Е.Б. Дунина, В. А. Жизневский, А. С. Соколова// УО "ВГТУ" – Витебск, 2020. – 47 с.

101. Дунина Е.Б. ЭУМК Компьютерное зрение и распознавание образов для специальности 1-53 80 01 «Автоматизация» второй степени высшего образования № 3142021721 от 13.02.2020

