

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

УДК 548

№ ГР 20114432

Инв № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе



Е.В.Ванкевич

30 декабря 2013 г.

О Т Ч Е Т

О научно-исследовательской работе

«Разработка новых методик и алгоритмов для обработки экспериментальных данных по спектроскопии и фотофизике оптических наноструктурированных материалов, активированных лантаноидами»
по заданию 2.2.02 «Спектроскопия, фотофизика и технология создания оптических наноструктурированных материалов, активированных лантаноидными и макрогетероциклическими соединениями»

(Заключительный)

390

Научный руководитель

24.12.13

А.А.Корниенко

Начальник НИЧ

20.12.2013

С.А.Беликов

Витебск, 2013г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

24.12.13



дата, подпись

Корниенко Алексей
Александрович
(Введение, заключение)

Исполнители:

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

20.12.13

дата, подпись

Дунина Елена
Брониславовна
(Раздел 1-2)

кандидат физ.-мат. наук,
с.н.с.

20.12.2013



дата, подпись

Фомичёва Людмила
Александровна
(Раздел 1 и 2)

н.с.

20.12.13

дата, подпись

Королев Сергей
Олегович
(Раздел 1)

Нормоконтролёр

20.12.13



дата, подпись

Шилин Александр
Дмитриевич

РЕФЕРАТ

Отчет 142с., 61 табл., 20 рисунков 107 источников.
САМАРИЙ, ЕВРОПИЙ, ДИСПРОЗИЙ, ПРАЗЕОДИМ, LiNbO_3 , $\text{Ca}_3(\text{BO}_3)_2$, $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$, ЦИНК БОРАТНЫЕ СТЕКЛА, ИНТЕНСИВНОСТИ АБСОРБЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ, КОНФИГУРАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Объектом исследования являются кристаллы LiNbO_3 , $\text{Ca}_3(\text{BO}_3)_2$, $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$, активированный ионами самария, диспрозия, празеодима и цинк боратные стекла различного состава, активированные ионами европия.

Цель работы – установить значимость влияния возбужденных конфигураций на спектроскопические характеристики кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Sm}^{3+}$, $\text{Ca}_3(\text{BO}_3)_2:\text{Dy}^{3+}$, $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Pr}^{3+}$ и иона европия в цинк боратных стеклах, сделать вывод о наиболее адекватном приближении для описания экспериментальных результатов.

На основе теории погрешностей в косвенных измерениях разработана новая методика, применимая для определения погрешностей параметров, определяемых в результате диагонализации матрицы большой размерности.

С помощью этого метода разработана новая методика определения погрешностей параметров, удобная для компьютерной реализации. Вычислены погрешности параметров интенсивности для борованадатных стекол, активированных празеодимом.

Установлено, что более адекватный учет влияния возбужденных конфигураций в приближении промежуточного конфигурационного взаимодействия в случае иона самария и диспрозия или в приближении аномально сильного конфигурационного взаимодействия для иона европия приводит к уменьшению среднеквадратичного отклонения вычисленных значений сил осцилляторов от соответствующих экспериментальных значений на 30–50% по сравнению с приближением слабого конфигурационного взаимодействия. Таким образом обычная практика применения приближения слабого конфигурационного взаимодействия для этих ионов кажется неоправданной.

Разработана и апробирована методика определения параметров кристаллического поля нечетной симметрии и параметров ковалентности из экспериментальных данных по оптическим спектрам. Применение разработанной методики существенно расширяет возможности оптической спектроскопии по определению электронного строения оптических центров.

Для иона Pr^{3+} в нанокристалле $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ с локальной тригональной симметрией впервые по экспериментальным данным оптической спектроскопии определены параметры кристаллического поля нечетной симметрии и параметры ковалентности химической связи $\text{Pr}^{3+} - \text{O}^-$.

Описание оптических спектров с помощью гамильтониана кристаллического поля в приближении аномально сильного конфигурационного взаимодействия, кроме того позволяет определять параметры кристаллического поля нечетной симметрии и параметры пространственного распределения электронной плотности или параметры ковалентности. До этого параметры кристаллического поля нечетной симметрии вообще невозможно было определить из экспериментальных данных, а параметры ковалентности определялись из экспериментальных спектров двойного электронно-ядерного резонанса. Таким образом применение новой методики существенно расширяет возможности экспериментальных методов оптической спектроскопии.

Основные результаты отражены в 31 работах, опубликованных в изданиях различного уровня.

СОДЕРЖАНИЕ

ЧАСТЬ 1. Разработка методики обработки экспериментальных данных по оптической спектроскопии для кубических кристаллов с учетом конфигурационного взаимодействия.....	7
Введение	7
1 Методика описания силы осцилляторов абсорбционных переходов в борованадатных стеклах, активированных празеодимом.....	9
1.1 Методика определения погрешностей параметров теории в косвенных измерениях.	9
1.2 Определение погрешностей параметров интенсивности в методе наименьших квадратов.....	11
1.3 Краткие основы теории интенсивностей.....	12
1.3 Методика определения параметров интенсивности и их погрешностей в борованадатных стеклах.....	16
2 Методика описания кристаллического расщепления мультиплетов тулия во фторидах с учетом конфигурационного взаимодействия.....	20
3 Методика описания кристаллического расщепления мультиплетов урана в хлоридах с учетом конфигурационного взаимодействия.....	25
3.1 Краткое введение в проблему.....	25
3.2 Методика учета влияния аномально сильного конфигурационного взаимодействия на расщепление мультиплетов урана.....	26
3.3 Результаты для молекулярного комплекса UCl_6^{2-} и их обсуждение	27
4 Методика описания кристаллического расщепления мультиплетов урана в бромиды с учетом конфигурационного взаимодействия.....	32
Заключение.....	37
Список использованных источников в первой части.....	39
ЧАСТЬ 2. Разработка методики обработки экспериментальных данных по оптической спектроскопии для анизотропных кристаллов с учетом сильного конфигурационного взаимодействия	44
Введение	44
5 Методика описания силы осцилляторов абсорбционных переходов в кальций-скандий-германиевом гранате, активированном празеодимом.....	46
5.1 Методика расчета времени жизни и коэффициентов ветвления люминесценции.....	46
5.2 Результаты расчета времени жизни и коэффициентов ветвления люминесценции в кальций-скандий-германиевом гранате.....	49
6 Методика расчета времени жизни 1S_0 состояния иона празеодима с учетом	

конфигурационного взаимодействия.....	55
6.1 Расчет времени жизни 1S_0 состояния иона празеодима в кристалле LaF_3	55
6.2 Расчет времени жизни 1S_0 состояния иона празеодима в кристалле $SrAl_{12}O_{19}$	62
6.3 Заключительные замечания о расчете времени жизни	68
7 Методика расчета кристаллического расщепления мультиплетов иона Tm^{3+} в кристаллах тригональной симметрии.	70
7.1 Перспективы применения иона Tm^{3+} в оптических устройствах	70
7.2 Одноэлектронная форма гамильтониана кристаллического поля	70
7.3 Приближение аномально сильного конфигурационного взаимодействия для иона Tm^{3+} в оксидных кристаллах.....	71
7.4 Описание штарковской структуры мультиплетов иона Tm^{3+} в приближении аномально сильного конфигурационного взаимодействия	74
7.5 Заключительные замечания по кристаллическому полю иона Tm^{3+} в $YAl_3(BO_3)_4$	79
8 Методика расчета кристаллического расщепления мультиплетов иона Eu^{3+} с учетом конфигурационного взаимодействия	80
8.1 Гамильтониан кристаллического поля в приближении промежуточного конфигурационного взаимодействия	80
8.2 Методика описания кристаллического расщепления мультиплетов иона Eu^{3+} в TiO_2	82
8.3 Заключительные замечания по кристаллическому полю Eu^{3+} в TiO_2	88
Заключение.....	89
Список использованных источников во второй части.....	92
ЧАСТЬ 3. Разработка новых алгоритмов и методик обработки экспериментальных данных по оптической спектроскопии наноструктурированных материалов.....	96
Введение	96
9 Методика описания абсорбционных переходов в нанокристаллах, активированных ионами самария	98
9.1 Методика расчета интенсивностных характеристик излучательных и абсорбционных переходов	98
9.2 Расчет спектроскопических характеристик иона Sm^{3+} в кристалле $LiNbO_3$	102
10 Сравнительный анализ применимости различных методик для описания спектроскопических свойств лазерных материалов, активированных европием	106
11 Оптимальная методика для описания интенсивности абсорбционных переходов боратных нанокристаллов, активированных диспрозием.....	115
12 Методика учета влияния возбужденных конфигураций на кристаллическое	

расщепление мультиплетов празеодима в нанокристаллах тригональной симметрии	120
12.1 Краткое введение в проблему теории кристаллического расщепления мультиплетов.....	120
12.2 Схема вывода эффективного гамильтониана кристаллического поля.....	121
12.3 Результаты описания кристаллического расщепления мультиплетов иона Pr^{3+} в нанокристалле $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$	127
Заключение.....	134
Список использованных источников.....	138

Витебский государственный технологический университет

Список использованных источников в первой части

1. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок / Дж. Тейлор. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 272 с.
2. Дунина, Е.Б. Методика определения погрешностей параметров, задающих физические величины нелинейными и матричными уравнениями / Е.Б. Дунина, В.М. Деткова // Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. 1999г. №2(12), с. 75-78.
3. Собельман, И.И. Введение в теорию атомных спектров / И.И. Собельман. – М., Физматгиз, 1963. – 640 с.
4. Спектры люминесценции европия / М.И. Гайдук [и др.]. – М.: Наука, 1974. – 195 с.
5. Judd, B.R. Optical Absorption Intensities of Rare-Earth Ions / B.R. Judd // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 127, № 3. – P. 750-761.
6. Ofelt, G.S. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions / G.S. Ofelt // J. Chem. Phys. – 1962. – Vol.37, №3. – P. 511-520.
7. Зависимость силы линий электрических дипольных $f-f$ переходов от энергии мультиплетов иона Pr^+ в YAlO_3 / Дунина Е.Б. [и др.] // ФТТ.– 1990.– Т.32, № 5.– С. 1568-1570.
8. 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.
9. Kornienko, A.A. Dependence of the line strength of $f-f$ transitions on the manifold energy. I. Projector on the basis of nonorthogonal functions / A.A. Kornienko, A.A. Kaminskii, E.B.Dunina // Phys. Stat. Sol.(b).– 1990.– Vol.157, №1.– P. 261-266.
10. 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.
11. 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.
12. El Okr, M. Spectroscopic studies of the Pr³⁺-doped borovanadate glass / M. El Okr, M. Farouk, M. El-Sherbiny, M.A.K. El-Fayoumi, M.G. Brik // J. Alloys Compd. – 2010. – Vol. 490, № 1-2. – P. 184-189.
13. Дунина, Е.Б. Корреляция между интенсивностями межмультиплетных электрических дипольных переходов и тонкими деталями штарковской структуры мультиплетов иона Pr³⁺ в LaCl₃ / Е.Б.Дунина, А.А.Корниенко, А.А.Каминский // ФТТ. – 2006. –Т. 48, № 5. – С. 826-830.
14. Корниенко, А.А. Влияние межконфигурационного взаимодействия на кристаллическое поле Ln³⁺ - ионов / А.А. Корниенко, А.А. Каминский, Е.Б. Дунина // ЖЭТФ. – 1999. – Т.116, №6. – С. 2087-2102.
15. Корниенко, А.А. Определение параметров интенсивности по тонким деталям штарковской структуры энергетического спектра иона Tm³⁺ в Y₃Al₅O₁₂ / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // Опт. и спектр. – 2004. – Т.97, №1. – С. 75-82.
16. А Корниенко, А.А. Зависимость штарковской структуры от энергии мультиплетов / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – Т.59. №6. – С. 385-388.
17. Kaminskii, A.A. Parametrization of electric-dipole intensities in f^N systems due to electron-correlation effects/ A.A. Kaminskii, A.A. Kornienko, M.I. Chertanov // Phys. Stat. Sol.(b). – 1986. – Vol. 134, № 2. – P. 717-729.
18. Spectroscopy and dynamics of upconversion in Tm³⁺: YLiF₄ / M. Dulick [et al.]//J. Lumin. – 1991. – Vol. 48-49. – P. 517-521.
19. Satten, R.A. Energy levels of U⁴⁺ in an octahedral crystalline field / R.A. Satten, C.L. Schreiber, E.Y. Wong.// J. Chem. Phys. – 1965. – Vol.42, №1. – P. 162-171.

20. Satten, R.A. Zeeman splitting of vibronic levels for octahedral actinide and lanthanide complexes, free and in crystals / R.A. Satten, D.R. Johnston, E.Y. Wong. // Phys. Rev. – 1968. – Vol. 171, №2. – 370-377.
21. Karbowski, M. $5f^N-5f^{N-1}6d^1$ transitions of U^{3+} and U^{4+} ions in high-symmetry sites / M.Karbowski, J. Drożdżyński. // J. Phys. Chem. A. – 2004. – Vol.108, №30. – 6397-6406.
22. Barandiarán, Z. Structure and spectroscopy of U^{4+} defects in Cs_2ZrCl_6 : Ab initio theoretical studies on the $5f^2$ and $5f^16d^1$ manifolds / Z. Barandiarán, L. Seijo. // J. Chem. Phys. – 2003. – Vol. 118, №16. – 7439-7457.
23. Flint, C.D. Vibronic spectra of U^{4+} in octahedral crystal fields. IV. Absorption spectra and crystal field calculations / C.D. Flint, P.A. Tanner.// Mol. Phys. – 1987. – Vol. 61, № 2. – 389-407.
24. Evidence for strong interaction between the $5f^2$ and $5f^17p^1$ configurations of U^{4+} in the octahedral sites of Cs_2UBr_6 and Cs_2ZrBr_6 / M.D. Faucher [et al.] // Phys. Rev. B. – 1996. – Vol. 53, № 15. – P. 9501-9504.
25. 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.
26. Фомичева, Л.А. Описание штарковского расщепления мультиплетов иона Pr^{3+} в кристаллах La_2O_3 и Pr_2O_3 / Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина. //Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. – 2010. – Т. 30, №5. – 134-141.
27. Фомичева, Л.А. Взаимосогласованное описание штарковской структуры мультиплетов и интенсивностей абсорбционных переходов иона Pr^{3+} в $Y_3Al_5O_{12}$ / Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина// Оптика и спектроскопия. – 2008. – Т.105, №3. – С. 364-369
28. Фомичева, Л.А. Влияние конфигурационного взаимодействия на расщепление мультиплетов молекулярных комплексов TmF_6^{3-} и $TmCl_6^{3-}$ / Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // ЖПС. – 2010. – Т.77, №2. –

29. Фомичева, Л.А. Моделирование оптических свойств иона U^{4+} в кристалле $ZrSiO_4$ / Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // ЖТФ. – 2007. – Т. 77, №10. – С.6-10.
30. Wybourne, B.G. Spectroscopic Properties of Rare Earths / B.G. Wybourne. – New York: J. Wiley and Sons Inc, 1965. – 236 p.
31. Корниенко, А.А. Теория спектров редкоземельных ионов в кристаллах. Курс лекций. / А.А. Корниенко. – Витебск: Издательство УО "ВГУ им. П.М. Машерова", 2003. – 128 с.
32. Ковалева, В.А., Дунина Е.Б., Корниенко А.А. Определение погрешностей параметров интенсивности в лазерных стеклах / В.А. Ковалева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // Материалы докладов XLIV научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО «ВГТУ». – Витебск, УО «ВГТУ», 2011. – С. 50-52
33. Ковалева, В.А. Сильное конфигурационное взаимодействие в борванадатных стеклах, активированных празеодимом / В.А. Ковалева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // Физика конденсированного состояния: материалы XIX респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов. (Гродно, 19-20 апр. 2011 г. , ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: Е.А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2011. С. 50-51.
34. Фомичева, Л.А. Влияние возбужденных конфигураций на штарковскую структуру мультиплетов иона Pr^{3+} в $LiYF_4$ / Л.А. Фомичева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // Оптика неоднородных структур – 2011: материалы III Международной научно-практической конференции, г. Могилев, 16-17 февраля 2011 г. / редкл.: В.А. Карпенко (отв. ред.) [и др.]. – Могилев: УО «МГУ им. А.А. Кулешова», 2011. С. 257-260
35. Фомичева, Л.А. Методика определения параметров пространственного распределения электронной плотности для иона U^{4+} в Cs_2ZrBr_6 и Cs_2UBr_6 по оптическим спектрам / Л.А. Фомичева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // «Гомельский научный семинар по теоретической физике, посвященный

- 100-летию со дня рождения Ф. И. Федорова», 20–22 июня 2011 г.: [материалы] / редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. с. 41-44
36. Фомичева, Л.А. Анализ кристаллического расщепления мультиплетов иона Pr^{3+} в YPO_4 с учетом влияния межконфигурационного взаимодействия / Л.А. Фомичева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, №12. – С. 89-92.
37. Прикладная математика: методические указания к практическим занятиям для студентов специальностей 1–50 01 02 «Конструирование и технология швейных изделий», 1–50 02 01 «Конструирование и технология изделий их кожи» / Е.Б. Дунина, А.А. Джежора, Т.В. Никонова, и др. – Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2011, 48с.
38. Фомичева, Л.А. Описание кристаллического расщепления иона U^{4+} в Cs_2UCl_6 с учетом аномально сильного конфигурационного взаимодействия / Л.А. Фомичева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», III Международная научная конференция (2011; Гомель). III Международная научная конференция «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», 9–11 ноября 2011 г. : посвященная 85-летию со дня рождения Б. В. Бокутя : [материалы] : в 2 ч. Ч. 1 / редкол. : А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – 172с. С. 94-98
39. Рубаник, В.В. Механика и молекулярная физика: лабораторный практикум по курсу «Физика». / В.В. Рубаник, А.А. Корниенко, Н.М. Лаппо, А.А. Котов – Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2011, 75с.
40. Описание штарковской структуры кубического эльпасолита $\text{Cs}_2\text{NaYCl}_6:\text{Eu}^{3+}$ / Я.А. Гуринович, Л.А. Фомичева, Е.Б. Дунина, и др. // Сборник трудов Международной конференции и семинаров. Т. 1. «Оптика-2011». Санкт-Петербург. 17-21 октября 2011/ Под. ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – СПб: НИУИТМО, 2011. – Т.1. с. 398-399

Список использованных источников во второй части

1. Study of the visible spectra of $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ garnet crystals doped with Ce^{3+} or Pr^{3+} / S. Pinelli et al // Opt. Mat. – 2004. – Vol. 25. – P. 91-99.
2. Judd, B.R. Optical Absorption Intensities of Rare-Earth Ions / B.R. Judd // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 127, № 3. – P. 750-761.
3. Ofelt, G.S. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions / G.S. Ofelt // J. Chem. Phys. – 1962. – Vol.37, №3. – P. 511-520.
4. Kornienko, A.A. Dependence of the line strength of $f-f$ transitions on the manifold energy. II. Analysis of Pr^{3+} in $\text{KPrP}_4\text{O}_{12}$ / A.A. Kornienko, A.A. Kaminskii, E.B. Dunina // Phys. Stat. Sol.(b). – 1990. – Vol. 157, № 1. – P. 267-273.
5. Корниенко, А.А. Теория интенсивностей электрических дипольных переходов в приближении сильного конфигурационного взаимодействия / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, В.Л. Янкевич В.Л. // Опт. и спектр. – 1996. – Т.80. – С. 871-874.
6. Дунина, Е.Б. Сильное конфигурационное взаимодействие в молекулярных комплексах UBr_6^{2-} и UCl_6^{2-} / Е.Б. Дунина, Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко // ЖПС. – 2012. – Т.79, №4. – С. 521 – 526.
7. Krupke, W.F. Optical Absorption and Fluorescence Intensities in Several Rare-Earth-Doped Y_2O_3 and LaF_3 Single Crystals / W.F. Krupke // Phys. Rev.- 1966.- V.145, N1.- P.325-337.
8. Wang, D. Application of original and modified Judd–Ofelt theories to the 1S_0 state of Pr^{3+} -doped $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$ and LaF_3 / D. Wang, S. Huang, F. You, et al // Physica B -2007. -V. 387 – P. 86–91
9. Маханек, А.Г. Аналитические методы в кватомеханической теории возмущений / А.Г. Маханек, В.С. Корольков.– Мн.: Наука и техника, 1982. – 327 с.
10. Crystal field analysis of Tm^{3+} and Yb^{3+} in YPO_4 and LuPO_4 / P.C. Becker [et

- al.]// J. Chem. Phys. – 1984. – Vol. 81, № 7. – P. 2872-2878.
11. Analysis of the optical spectrum of Tm^{3+} in $LiYF_4$ / H.P. Jenssen [et al.] // Phys. Rev. B. – 1975. – Vol. 11, №1. – P. 92-101.
12. Фомичева, Л.А. Моделирование оптических свойств иона U^{4+} в кристалле $ZrSiO_4$ / Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // ЖТФ – 2007. – Т. 77, №10. – С.6-10.
13. Корниенко, А.А. Зависимость штарковской структуры от энергии мультиплетов / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – Т.59, №6. – С. 385-388.
14. Собельман, И.И. Введение в теорию атомных спектров / И.И. Собельман. – М., Физматгиз, 1963. – 640 с.
15. Корниенко, А.А. Влияние межконфигурационного взаимодействия на кристаллическое поле Ln^{3+} - ионов / А.А. Корниенко, А.А. Каминский, Е.Б. Дунина // ЖЭТФ. – 1999. – Т.116, №6. – С. 2087-2102.
16. Корниенко, А.А. Теория спектров редкоземельных ионов в кристаллах. Курс лекций. / А.А. Корниенко. – Витебск: Издательство УО «ВГУ им. П.М. Машерова», 2003. – 128 с
17. Корниенко, А.А. Влияние эффектов смешивания конфигураций на штарковскую структуру мультиплетов иона Pr^{3+} в $LiYF_4$ / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, В.Л. Янкевич // Письма в ЖТФ. – 1994. – Т.20, №9. – С. 27-30.
18. Kebali, I. Energy levels and crystal-field analysis of Tm^{3+} in $YAl_3(BO_3)_4$ crystals / I. Kebali, M. Dammak, E.Cavalli, M. Bettinelli // J. Lumin. – 2011. – Vol.131. – P. 2010-2015
19. Wyckoff, R.W.G. Crystal structures: in 2 vol./ R.W.G. Wyckoff. – New York, 1951. – Vol.1,2.
20. Crystal Structure of $YAl_3(BO_3)_4$ / E.L. Belokoneva [et al.] // J. Struct. Chem. – 1981. – Vol.22, №3. – P. 476-478
21. Ma, C.-G. Spectroscopic and crystal-field analysis of energy levels of Eu^{3+} in SnO_2 in comparison with ZrO_2 and TiO_2 / C.-G. Ma, M.G. Brik, V. Kiisk, T. Kangur, I. Sildos // J. Alloys&Compounds. – 2011. – Vol. 509. – P. 3441 – 3451

22. Basiev, T.T. Pre-selection of optical transitions in rare-earth ions in crystals perspective for quantum information processing / T.T. Basiev, I.T. Basieva, A.A. Kornienko, V.V. Osiko, K.K. Pukhov and S.K. Sekatskii // Journal of Modern Optics -2012. - Vol. 59, No. 2, – P. 166–178.
23. Гуринович, Я.А. Расчет времени жизни 1S_0 мультиплета празеодима во фторидах / Я.А. Гуринович, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // Фізика, електроніка, електротехніка. Матеріали та програма науково-технічної конференції. (Суми, 16-21 квітня 2012 року). Суми, Сумський державний університет. –2012. – С. 39
24. Гуринович, Я.А. Расчет времени жизни 1S_0 состояния иона Pr^{3+} в $SrAl_{12}O_{19}$ с учетом конфигурационного взаимодействия / Я.А. Гуринович, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // Новые направления развития приборостроения. Материалы 5-й Международной студенческой научно-технической конференции. Минск, БНТУ. –2012. – С. 273
25. Ковалева, В.А. Анализ интенсивностей абсорбционных переходов иона празеодима в кальций-скандий-германиевом гранате / В.А. Ковалева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // Физика конденсированного состояния: сб. науч. ст. в 2ч. Ч. 1/ ГрГУ, –2012. – С. 47– 51
26. Гуринович, Я.А. Влияние эффектов ковалентности на штарковское расщепление мультиплетов иона Eu^{3+} в Rb_2NaEuF_6 / Я.А. Гуринович, Л.А. Фомичева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // Материалы докладов XLV Республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО «ВГТУ». – Витебск, УО «ВГТУ», –2012. - С. 49
27. Ковалева, В.А. Определение погрешностей параметров интенсивности в лазерных стеклах / В.А. Ковалева, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко // Материалы докладов XLV Республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО «ВГТУ». – Витебск, УО «ВГТУ», – 2012. - С. 60-62
28. Гуринович, Я.А. Расчет штарковских уровней иона Tm^{3+} в кристаллической

системе $YAl_3(VO_3)_4$ с учетом влияния конфигурационного взаимодействия/
Я.А. Гуринович, Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина,. // Сборник
трудов Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики
– 2012». Санкт-Петербург. 15-19 октября 2012/ Под. ред. проф. В.Г.
Беспалова, проф. С.А. Козлова. – СПб: НИУИТМО, 2012. – 571 с. – С. 166 –

168

Витебский государственный технологический университет

Список использованных источников

29. Judd, B.R. Optical Absorption Intensities of Rare-Earth Ions / B.R. Judd // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 127, № 3. – P. 750-761.
30. Ofelt, G.S. Intensities of crystal spectra of rare-earth ions / G.S. Ofelt // J. Chem. Phys. – 1962. – Vol. 37, №3. – P. 511-520.
31. Kornienko, A.A. Dependence of the line strength of $f-f$ transitions on the manifold energy. II. Analysis of Pr^{3+} in $\text{KPrP}_4\text{O}_{12}$ / A.A. Kornienko, A.A. Kaminskii, E.B. Dunina // Phys. Stat. Sol.(b). – 1990. – Vol. 157, № 1. – P. 267-273.
32. Корниенко, А.А. Теория интенсивностей электрических дипольных переходов в приближении сильного конфигурационного взаимодействия / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, В.Л. Янкевич // Опт. и спектр. – 1996. – Т.80. – С. 871-874.
33. 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.
34. Dominiak-Dzik, G. Sm^{3+} -doped LiNbO_3 crystals, optical properties and emission cross-sections / G. Dominiak-Dzik // J. Alloys Compd. – 2005. – Vol. 391, №1-2. – P. 26 – 32.
35. Ivankov, A. Optical properties of Eu^{3+} -doped zinc borate glasses/ A. Ivankov, J. Seekamp, W. Bauhofer // J. Lumin. – 2006. – Vol. 121, №1. – P. 123 –131.
36. Бельчикова, В.А. Расчет оптического поглощения и излучательных характеристик RTP стекол, активированных ионами Pr^{3+} / В.А. Бельчикова, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко// Физика конденсированного состояния: материалы XXI междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 18 – 19 апр. 2013 г./ ГрГУ им. Я.Купалы; редкол.: Г.А.Хацкевич (гл. ред.) [и др.]. –Гродно: ГрГУ, 2013. С. 4 – 6.

37. Дунина, Е.Б. Расчет спектроскопических характеристик иона Sm^{3+} в кристалле LiNbO_3 / Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко, Л.А. Фомичева //IV Конгресс физиков Беларуси, Минск, 24–26 апреля 2013г.: Сборник научных трудов. / редкол.: С. Я. Килин (гл. ред) [и др.]. – Минск : Ковчег, 2013. – С. 206-207
38. Бельчикова, В.А. Расчет спектроскопических свойств активных сред для твердотельных лазеров, допированных $4f^2$ ионами/ В.А. Бельчикова, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко// Тезисы докладов 46 Республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». – Витебск, 2013. – С. 76.
39. Корниенко, А.А. Расчет времени жизни мультиплета 3F_4 иона тулия в $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$ / А.А. Корниенко, Е.Б.Дунина, Л.А. Фомичева//Физика, электроника, электротехника:: 2013, Сумы, 22-27 апреля 2013г.: Материалы и программа научно-технической конференции / редкол.: С.И. Проценко (отв. за вып.) [и др.]. – Сумы, Сумский государственный университет, 2013. – С. 41.
40. Spectroscopy of $\text{Ca}_3(\text{BO}_3)_2: \text{Dy}^{3+}$ crystal / X. Lu [et al.]//J. Phys. Chem. Solids. – 2005. – Vol. 66, №10. – P. 1801-1805.
41. Dieke, G.H. Spectra and Energy Levels of Rare Earth Ions in Crystals / G.H. Dieke. – New York: J. Wiley and Sons Inc, 1968. – 401 p.
42. Judd, B.R. Operator Techniques in Atomic Spectroscopy / B.R. Judd. – New York: McCraw-Hill, 1963. – 242 p.
43. Wybourne, V.G. Spectroscopic Properties of Rare Earths / V.G. Wybourne. – New York: J. Wiley and Sons Inc, 1965. – 236 p.
44. Малкин, Б.З. Кристаллическое поле в одноосно сжатых кристаллах $\text{MeF}_2:\text{TR}$ / Б.З. Малкин, З.И. Иваненко, И.Б. Айзенберг// ФТТ. –1970. – Т.12, №7. –С.1873-1880.
45. Judd, B.R. Ligand field theory for actinides/ B.R. Judd // J. Chem. Phys. – 1977. – Vol. 66, № 7. – P. 3163-3170.
46. Judd, B.R. Correlation crystal fields for lanthanide ions/ B.R. Judd // Phys. Rev.

- Letт.– 1977.– Vol.39, №4.– P. 242-244.
47. Two-photon spectroscopy of europium(III) elpasolites / J.R.G Thorne [et al.] / J. Phys.: Condens. Matter. – 1999.– Vol.11, №40.– P. 7851-7866.
48. Evidence for strong interaction between the $5f^2$ and $5f^17p^1$ configurations of U^{4+} in the octahedral sites of Cs_2UBr_6 and Cs_2ZrBr_6 / M.D. Faucher [et al.] // Phys. Rev. B. – 1996. – Vol. 53, № 15. – P. 9501-9504.
49. Faucher, M.D. $4f^2/4f6p$ configuration interaction in $LiYF_4 :Pr^{3+}$ / M.D. Faucher, O.K. Moune // Phys. Rev. A. –1997. – Vol. 55, № 6. – P. 4150-4154.
50. Faucher, M. D. Electronic spectra and configuration interaction of Tm^{3+} in $TmCl_6^{3-}$ / M.D. Faucher, P.A. Tanner, C.S.K. Mak // J. Phys. Chem. – 2004. – Vol. 108. – P. 5278-5287.
51. Judd, B.R. Optical Absorption Intensities of Rare-Earth Ions / B.R. Judd // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 127, № 3. – P. 750-761.
52. Еремин, М.В. Техника учета переноса заряда в методе эффективного гамильтониана. / М.В. Еремин, А.А. Корниенко // ФТТ. – 1977, Т.19, №10. – С. 3024-3030.
53. Еремин, М.В. НАЗВАНИЕ СТАТЬИ/ М.В. Еремин// Оптика и спектр. – 1981.– Т.51, №1. – С. 136-???
54. Корниенко, А.А. Зависимость штарковской структуры от энергии мультиплетов / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – Т.59. №6. – С. 385-388.
55. Собельман, И.И. Введение в теорию атомных спектров / И.И. Собельман. – М., Физматгиз, 1963. – 640 с.
56. Корниенко, А.А. Влияние межконфигурационного взаимодействия на кристаллическое поле Ln^{3+} - ионов / А.А. Корниенко, А.А. Каминский, Е.Б. Дунина // ЖЭТФ. – 1999. – Т.116, №6. – С. 2087-2102.
57. Корниенко, А.А. Влияние эффектов смешивания конфигураций на штарковскую структуру мультиплетов иона Pr^{3+} в $LiYF_4$ / А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина, В.Л. Янкевич // Письма в ЖТФ. – 1994. – Т.20, №9. – С. 27-30.
58. Crystal Structure of $YAl_3(BO_3)_4$ / E.V Belokoneva [et al.]// J. Struct. Chem. –

1981. – Vol.22. №3. P. 476-477.
59. Crystal growth and spectroscopic characterization of Tm^{3+} -doped $KYb(WO_4)_2$ single crystals/ M.C. Pujol [et al.]// Phys. Rev. B. – 2002.– Vol.66, №14. – P.144304-8.
60. Growth, optical spectroscopy and crystal field investigation of $YAl_3(BO_3)_4$ single crystals doped with tripositive praseodymium / M. H. Bartl [et al] // Spectrochimica Acta Part A. – 2001. – Vol.57. – P. 1981–1990.
61. Growth, spectroscopic and thermal properties of Nd-doped disordered $Ca_9(La/Y)(VO_4)_7$ and $Ca_{10}(Li/K)(VO_4)_7$ crystals / P.A. Loiko [et al.] // J. Lumin. – 2013. – Vol.137. – P. 252–258.
62. Fomicheva, L. Description of Stark structure of the elpasolites $Cs_2NaPrCl_6$, Cs_2NaYCl_6 and Cs_2NaYBr_6 // L. Fomicheva, E. Dunina, A. Kornienko/ Universal Journal of Physics and Application. – 2013. Vol.1, №2. – P. 98-104.
63. Силы осцилляторов абсорбционных переходов из состояния 5D_0 в хантитоподобных поликристаллах $EuAl_3(BO_3)_4$ / Г.Е. Малашкевич [и др.]// ЖПС. – 2013. – Т.80, №4. – С. 551–556.
64. Бельчикова, В.А. Описание сил абсорбционных переходов иона европия в флюоридных стеклах / В.А. Бельчикова, Е.Б. Дунина, А.А. Корниенко// Оптика – 2013: сборник трудов VIII Международной конференции молодых ученых и специалистов, Санкт – Петербург, 14-18 окт. 2013 г. / СПб: СПбГУ ИТМО; под ред. В.Г. Беспалова, С.А. Козлова. – СПб: НИУИТМО, 2013. – С. 55-57.
65. Kornienko, A.A. Definition of odd symmetry crystal field parameters from optical spectrum // A.A. Kornienko, E.B. Dunina, L.A Fomicheva //Book of Abstracts of the XV International Feofilov Symposium on spectroscopy of crystals doped with rare earth and transition metal ions. Kazan, Russia. September 16-20, 2013/Kazan Federal University, A.F. Ioffe Physical-Technical Institute RAS, E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute RAS, RAS Council on Spectroscopy of Atoms and Molecules. – Kazan, 2013. –P.84.
66. Павлова, Е.В. Силы осцилляторов абсорбционных переходов европия в

оксидных материалах / Е.В. Павлова, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // Материалы докладов 46 Республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». – Витебск, 2013.– С. 170-172.

67. Фомичева, Л.А. Влияния конфигураций противоположной четности и эффектов ковалентности на кристаллическое поле иона Tm^{3+} в $YAl_3(BO_3)_4$ / Л.А. Фомичева, А.А. Корниенко, Е.Б. Дунина // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 15–18 окт. 2013г.: в. 3т./ ГНПО «ГНПЦ НАН Беларуси по материаловедению»; ред.колл.: Н.М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск: Ковчег, 2013. – Т.3. – С. 73-74

