

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДИМОВЫХ СТЕКОЛ

*Титаренко Николай Юрьевич (dep5@vniitf.ru), Лобода Евгений Анатольевич,  
Какишин Алексей Генрихович*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»,  
г. Снежинск Челябинской обл.

Представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных характеристик лазерных неодимовых стекол на фосфатной основе: ГЛС-22, N31, КНФС3 (2 различные варки). Полученные данные предназначены для сравнительной оценки различных типов стекол и расчета систем усиления лазерного импульса.

**Ключевые слова:** лазерное фосфатное неодимовое стекло, спектр люминесценции, спектр поглощения, время затухания люминесценции, сечение поглощения, сечение вынужденных переходов, удельная оптическая плотность.

## INVESTIGATION OF SPECTRAL AND LUMINESCENCE CHARACTERISTICS OF Nd:GLASSES

*Titarenko Nikolai Yurevich (dep5@vniitf.ru), Loboda Evgeniy Anatolevich,  
Kakshin Aleksey Genrihovich (dep5@vniitf.ru)*

FSUE «RFNC-VNIITF named after academ. E. I. Zababakhin»,  
Snezhinsk Chelyabinsk region

Investigation results of spectral-luminescence characteristics of phosphate-based Nd:glass (GLS-22, N31, KNFS3 (2 different species)) are presented. The data obtained is meant for a comparative assessment and calculations of laser pulse amplification systems.

**Key words:** laser phosphate Nd:glass, luminescence spectrum, absorption spectrum, luminescence decay time, absorption cross-section, stimulated emission cross section, specific optical density.

### Введение

Эффективность накачки и усиления лазерных импульсов в значительной степени определяется комплексом спектральных характеристик люминесценции и поглощения активной среды (см. табл. 1). В особенности это относится к лазерным стеклам, активированным ионами редкоземельных металлов: спектры люминесценции являются неоднородно уширенными и в значительной степени зависят от состава, чистоты ингредиентов, технологии производства и даже номера конкретной варки. В связи с этим расчет многокаскадных лазерных систем и определение характеристик выходного излучения требует точной информации о профиле линии люминесценции (усиления) и характеристиках поглощения. В справочной литературе и публикациях часто приводится ограниченный ряд численных парамет-

ров, которые лишь в некоторой степени характеризуют активную среду, но не позволяют проводить расчеты и оценки. Наиболее полный объем информации имеется на промышленные зарубежные и старые сорта российских стекол, прошедшие проверку в различных лазерных системах.

Нередко в различных источниках значения ключевых параметров довольно заметно отличаются друг от друга, а информация о спектральных распределениях поглощения и полосы усиления, необходимая для расчетов, или отсутствует, или приводится в графическом формате (в основном, для старых сортов стекол). Для практического использования такие данные не пригодны.

Для получения актуальной информации о спектрально-люминесцентных характеристиках образцов активных элементов из неодимовых стекол, применяемых в составе лазерных установок РФЯЦ-

ВНИИТФ, были собраны 2 оптических стенда. Измерение характеристики поглощения излучения накачки проведены с помощью коммерческого спектрофотометра.

## Описание эксперимента и методики измерений

### Исследование спектрально-люминесцентных характеристик

Исследование спектрально-люминесцентных характеристик было проведено при помощи стенда, изображенного на рис.1.

Для создания инверсии в активной среде применялся лазер с мощностью выходного излучения ~15 мВт на длине волны 532 нм. После подавления основной гармоники фильтром СЗС22 пучок фокусировался на поверхность исследуемого образца. Из области накачки, локализованной в точке фокусировки, излучение люминесценции коллимировалось и направлялось в спектрограф с помощью 2 зеркал, алюминиевое покрытие которых исключало спек-

тральные искажения в исследуемом диапазоне. Спектрограф был собран на основе нарезной, покрытой слоем алюминия, дифракционной решетки  $600 \text{ мм}^{-1}$ , объектива Helios ( $f = 57,4 \text{ мм}$  при  $\lambda = 1064 \text{ нм}$ ) и камеры VideoScan VS415USB с матрицей SONY ICX415AL (768 пикселей в направлении дисперсии, размер пикселя  $8,3 \times 8,3 \text{ мкм}$ ), спектральное разрешение составляло  $0,2 \text{ нм}$ . Калибровка была выполнена по линиям люминесценции кристалла Nd:YAG, спектральная точность составила  $\pm 0,1 \text{ нм}$ . Относительная спектральная чувствительность камеры в диапазоне  $1000 \dots 1150 \text{ нм}$  была определена с точностью  $\pm 3 \%$  при помощи лампы накаливания и измерителя мощности с элементом P-типа, имеющего ровную характеристику.

Полученные изображения, рис. 2, обрабатывались программным способом, в которых учитывались спектральная чувствительность регистратора и характеристики оптических фильтров. Данные сохранены в виде таблиц, определены  $\lambda_0$ ,  $\Delta\lambda_{FWHM}$  и  $\Delta\lambda_{\text{ЭФФ}}$ .

Таблица 1

Перечень исследованных спектрально – люминесцентных параметров

Измеряемая характеристика	Определяемые параметры	Использование в расчётах
Форма спектра люминесценции в области основного лазерного перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ( $\lambda_0 \sim 1054 \text{ нм}$ )	$\lambda_0$ – длина волны, соответствующая максимуму линии люминесценции (усиления); $\Delta\lambda_{FWHM}$ – ширина линии (по уровню 0,5); $\Delta\lambda_{\text{ЭФФ}}$ – ширина линии (эффективная); $\tau_0$ – время затухания люминесценции	Расчет усиления широкополосного излучения; Расчет параметров усиленного спонтанного излучения (УСИ)
Спектр поглощения излучения в диапазоне $250 \dots 1000 \text{ нм}$	$\sigma_{abs}(\lambda)$ – сечение спектрального поглощения; $P_{уд}(\lambda)$ – удельная оптическая плотность; $\sigma_0$ – сечение вынужденных переходов при $\lambda_0$ .	Расчет скорости накачки активной среды; Расчет инверсии в активном элементе; Расчет эффективности усилителя; Сравнительный анализ различных марок стекла

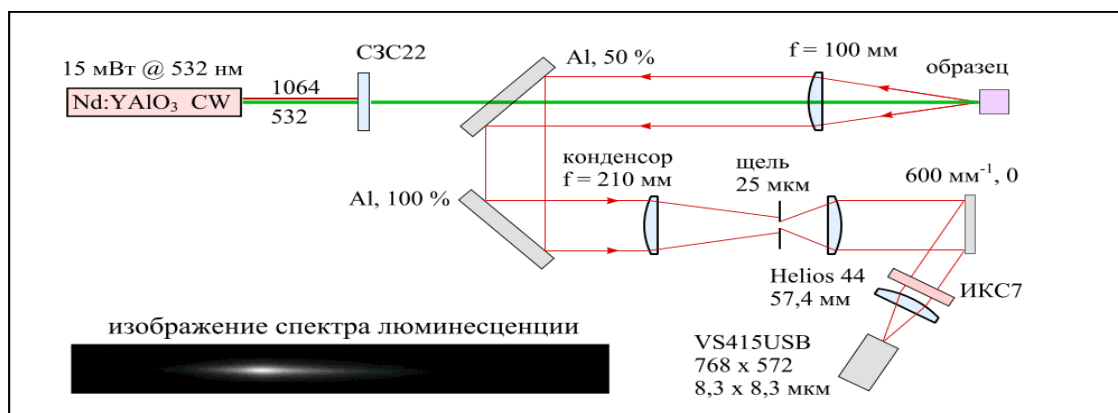


Рис 1. Оптическая схема измерения спектров люминесценции неодимовых стёкол в области основного лазерного перехода  $\text{Nd}^{3+} {}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$

Время затухания люминесценции измерялось при помощи схемы (рис. 3), состоящей из непрерывного Nd:YAG лазера (532 нм, 4 Вт), механического затвора в фокусе телескопа и инфракрасного фотодиода ФД7К. Время отклика схемы измерения  $\leq 10$  мкс. Время затухания определялось при обработке осциллограмм (рис. 4) методом наименьших квадратов (МНК) с точностью  $\pm 3$  мкс.

### Измерение спектральных характеристик поглощения и сечения вынужденных переходов

Измерения характеристик поглощения излучения накачки в неодимовых стеклах в диапазоне длин волн 250...1000 нм были проведены с помощью спектрофотометра со спектральным разрешением 1 нм. Исследуемые образцы обладали однотипными параметрами:  $\varnothing 20$  мм, толщина  $t = 3,95$  мм.

Полученные на спектрофотометре спектральные характеристики пропускания образцов  $T(\lambda)$  (рис. 5) обрабатывались на ПЭВМ. Спектральные характеристики представляются либо в виде сечения поглощения излучения ионами  $\text{Nd}^{3+} - \sigma_{\text{abs}}(\lambda)$ , либо в виде удельной оптической плотности  $-P_{\text{уд}}(\lambda)$ .

$$\sigma_{\text{abs}}(\lambda) = -(\rho_{\text{Nd}} \cdot t)^{-1} \cdot \ln[T'(\lambda)/T_0(\lambda)] \quad (1)$$

$$P_{\text{уд}}(\lambda) = -10^{20} \text{ см}^{-3} \cdot (\rho_{\text{Nd}} \cdot t)^{-1} \cdot \lg[T'(\lambda)/T_0(\lambda)], \quad (2)$$

где  $t$  [см] – толщина образца,  $\rho_{\text{Nd}}$  [см<sup>-3</sup>] – концентрация ионов  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $T'(\lambda) = T(\lambda)/K(\lambda)$  – пропускание с учетом френелевских потерь на поверхностях образца (функция  $K(\lambda) = 2n(\lambda)/(n^2(\lambda) + 1)$  учитывает потери многократного переотражения, рис. 6).

Зависимость  $n(\lambda)$  определялась при помощи дисперсионной формулы Зелмайера:

$$n(\lambda)^2 - 1 = \frac{B_1 \lambda^2}{(\lambda^2 - C_1)} + \frac{B_2 \lambda^2}{(\lambda^2 - C_2)} + \frac{B_3 \lambda^2}{(\lambda^2 - C_3)} \quad (3)$$

Поправка  $T_0(\lambda)$  в формулах (1) и (2) учитывает потери в стеклообразующей массе, в значительной степени вызванные наличием ионов  $\text{Pt}^{4+}$ .

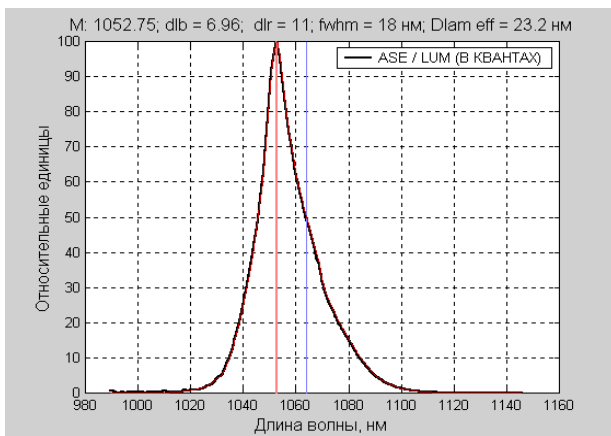


Рис. 2. Спектр люминесценции образца неодимового стекла N31

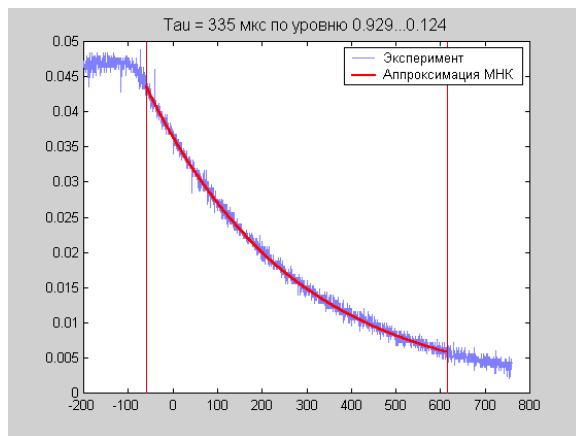


Рис. 4. Осциллограмма процесса затухания люминесценции (образец N31)

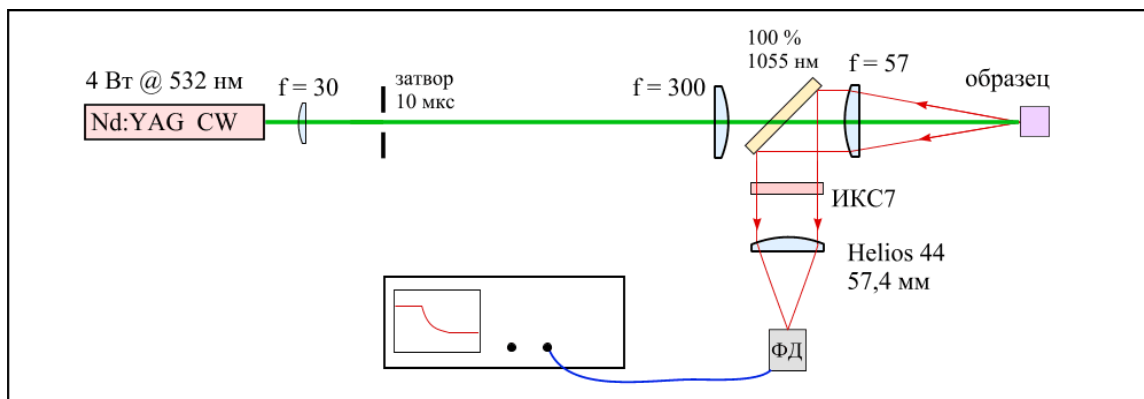


Рис. 3. Схема измерения времени затухания люминесценции  $\tau_{\text{л}}$

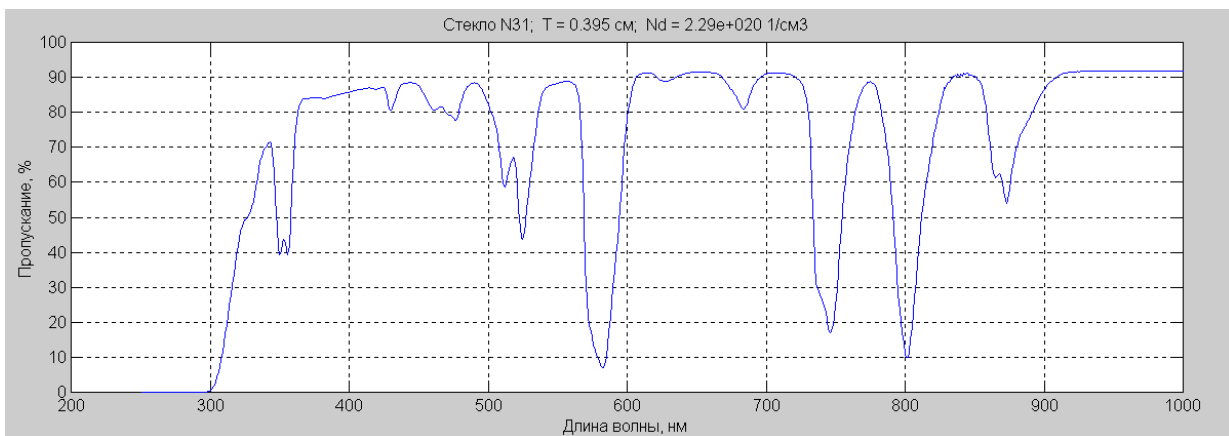


Рис. 5. Спектральная характеристика пропускания образца стекла N31,  $t = 3,95$  мм, концентрация ионов Nd  $\rho_{Nd} = 2,29 \cdot 10^{20}$  см $^{-3}$



Рис. 6. Пропускание  $T'(\lambda)$  N31 с поправкой на коэффициент отражения от поверхностей (толщина образца 3,95 мм)



Рис. 7. Пропускание стеклообразующей основы  $T_0(\lambda)$  образца N31 толщиной 3,95 мм;

Повышенное содержание ионов  $Pt^{4+}$  приводит к снижению инверсии и коэффициента усиления: в области спектра, где Xe лампы обладают максимальной светоотдачей (350...550 нм), а интенсивность полос поглощения  $Nd^{3+}$  относительно слабая, заметная доля излучения накачки может теряться и трансформироваться в нагрев активного элемента.

Концентрация платины контролируется по величине натурального показателя поглощения при

$$\lambda = 400 \text{ нм: } \alpha_{Pt}(400) \leq 0,25 \text{ см}^{-1} \rightarrow \rho_{Pt} \leq 150 / 10^6 \text{ [1].}$$

Так как зависимость  $T_0(\lambda)$  математически описать невозможно, ее вид определялся с помощью алгоритма интерполяции по нескольким реперным точкам зависимости  $T'(\lambda)$  (рис. 7) в диапазоне длин волн от 300 до 600 нм.

В результате с учетом всех поправок по формулам (1) и (2) получены спектральные зависимости

удельной оптической плотности  $P_{уд}(\lambda)$  (рис. 9) и сечения поглощения излучения накачки ионами  $Nd^{3+}$  в стекле  $\sigma_{abs}(\lambda)$  (рис. 8, а). Здесь же (рис. 8, б) для сравнения приведена соответствующая характеристика для фосфатного неодимового стекла LG770 (Schott Glass), исследованного в работе [2].

Необходимо отметить, что при расчете скорости накачки неопределенность характеристик при  $\lambda < 350$  нм можно не учитывать, так как излучение Хе ламп в данной спектральной области обычно подавляется в их оболочке, изготовленной из легированного оксидом церия кварцевого стекла [3].

Значение, на рис. 8, а) к площади полосы люминесценции (усиления) основного лазерного перехода:

$$\sigma_0 = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ см} \cdot R_{750} / \Delta\lambda_{ЭФФ}^{1054} \quad (4)$$

$$R_{750} = \frac{3ch(2J+1)}{8\pi^3 e^2 \lambda \xi} \cdot \int_{\Delta\lambda} \sigma_{abs}(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

где  $J=9/2$  – квантовое число нижнего рабочего уровня,  $\xi = (n^2 + 2)^2 / 9n$  – корректирующий фактор локального поля в диэлектрике,  $c = 2,998 \cdot 10^{10}$  см/с – скорость света в вакууме,  $e = 4,80325 \cdot 10^{-10}$  ед. СГСЭ – заряд электрона,  $h = 6,626 \cdot 10^{-27}$  эрг·с – постоянная Планка,  $\Delta\lambda$  – спектральный диапазон интегрирования полосы 750 нм.

Коэффициенты пропускания образцов  $T(\lambda)$  измерялись на спектрофотометре с относительной погрешностью не более 1 %.

Однако, при определении значений  $\sigma_{abs}(\lambda)$ ,  $P_{уд}(\lambda)$ ,  $\sigma_0$ , следует учитывать, что заявленная произ-

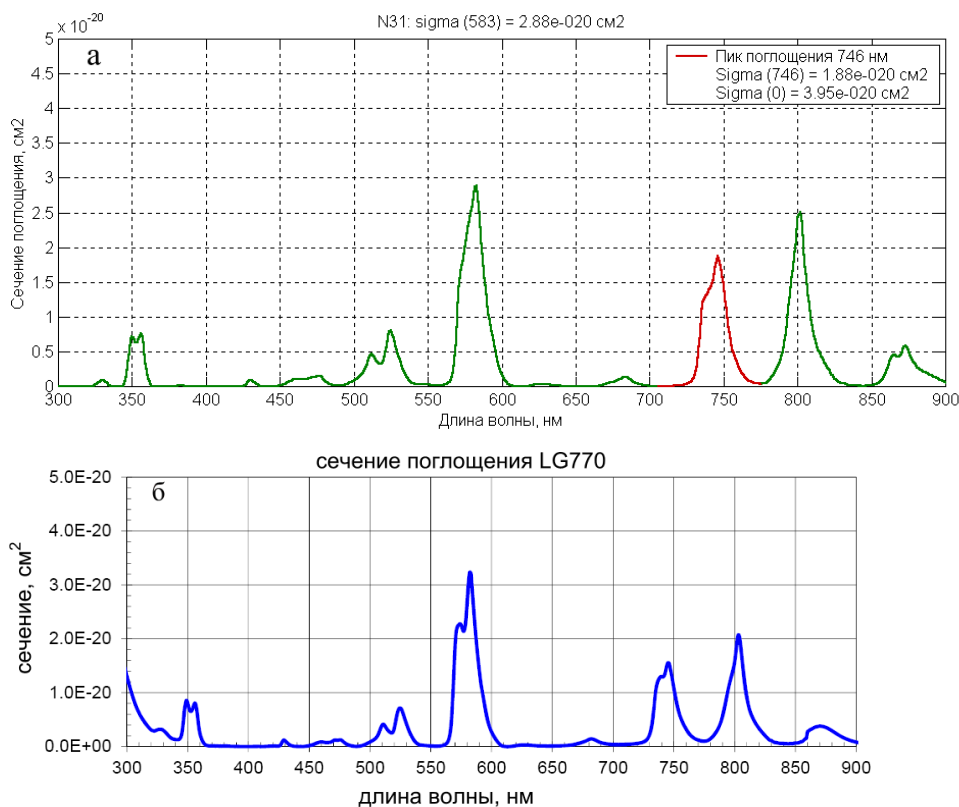


Рис. 8. Спектральные зависимости сечения поглощения ионов  $Nd^{3+}$   $\sigma_{abs}(\lambda)$  в стеклах: а – N31, б – LG770

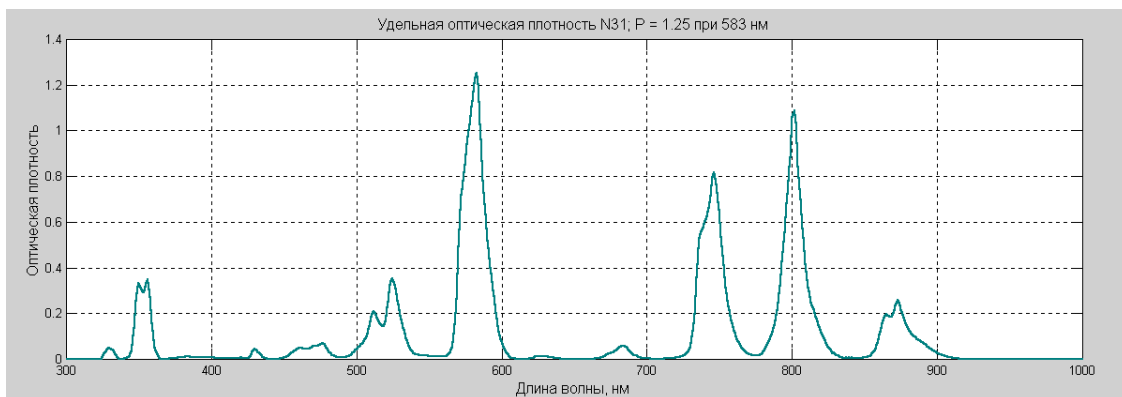


Рис. 9. Спектральная характеристика удельной оптической плотности  $P_{уд}(\lambda)$ , N31

Спектрально – люминесцентные параметры

Марка стекла/концентрация Nd <sup>3+</sup>	$\lambda_0$ , нм	$\Delta\lambda_{FWHM}$ , нм	$\Delta\lambda_{\text{ЭФФ}}$ , нм	$\tau_{\text{л}}$ , мкс
ГЛС22/2,0·10 <sup>20</sup> см <sup>-3</sup>	<b>1053,6</b> (1054)	<b>21,2</b> (19)	<b>26,2</b> (24,6÷28,6)	<b>285</b> (280)
N31/2,26·10 <sup>20</sup> см <sup>-3</sup>	<b>1052,8</b> (1053)	<b>18</b> (20)	<b>23,2</b> (25)	<b>335</b> (340)
КНФС3/3,5·10 <sup>20</sup> см <sup>-3</sup> для Снежинска	<b>1052,8</b> (1053,7)	<b>18,8</b> (-)	<b>24,2</b> (-)	<b>280</b> (310)
КНФС3/3,5·10 <sup>20</sup> см <sup>-3</sup> для Сарова	<b>1052,8</b> (1053,7)	<b>18,7</b> (-)	<b>24,4</b> (-)	<b>310</b> (310)

Таблица 3

Параметры поглощения излучения накачки и сечения  $\sigma_0$  (~ 1053 нм)

Марка стекла, $\rho_{\text{Nd}} \cdot 10^{20}$ см <sup>-3</sup>	$P_{\text{уд max}}$ , см <sup>-1</sup>	$\sigma_{\text{abs max}}$ , ×10 <sup>-20</sup> см <sup>2</sup>	$\sigma_0$ , ×10 <sup>-20</sup> см <sup>2</sup>	$\alpha_{\text{Pt}}(400)$ , см <sup>-1</sup>
ГЛС22, 2,0	<b>1,26</b> (1,29)	<b>2,91</b>	<b>3,53</b> (3,5)	<b>0,4</b>
КНФС3 - 3,5 Снежинск	<b>1,31</b> (1,26÷1,31)	<b>3</b>	<b>3,78</b> (3,6)	<b>0,11</b>
КНФС3 - 3,5 Саров	<b>1,23</b> (1,26÷1,31)	<b>2,83</b>	<b>3,49</b> (3,6)	<b>0,17</b>
N31, 2,29	<b>1,25</b>	<b>2,9</b>	<b>3,95</b> (4,0)	<b>0,12</b>

\* значения в скобках – данные производителя или из обзора [5, 6]

водителем концентрация Nd<sup>3+</sup> может иметь разброс, величина которого точно неизвестна (зависит от технологического процесса), и может достигать 10 %.

### Обсуждение результатов измерений

Численные параметры измеренных характеристик приведены в табл. 2 и табл. 3.

Особый интерес представляет сравнение характеристик поглощения образцов КНФС3-3,5: № 1 – для Снежинска, № 2 – для Сарова и N31.

Для стекол КНФС3-3,5 (№ 1) и N31 значения  $\sigma_{\text{abs max}} \approx 3 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup>, а спектральные характеристики практически совпадают (рис. 10). Это означает, что концентрации активатора в этих образцах соответствуют заявленным паспортным значениям с точностью  $\sim \pm 2\%$ .

По составу стекла КНФС3-3,5 (№1) несколько отличается от N31 (что не принципиально), так как отношения сечений в пиках поглощения  $K(\lambda_i) = \sigma_{\text{abs}}^{\text{КНФС3}} / \sigma_{\text{abs}}^{\text{N31}}$  в диапазоне длин волн от 400 до 900 нм неодинаковы:  $K(800 \text{ нм}) \approx 1,05$  при  $K(\lambda_i) \leq 1$ .

Образец стекла КНФС3-3,5 (№ 2) заметно отличается от образца № 1: сечение поглощения во всем спектральном диапазоне оказалось в среднем на 8 % ниже (рис. 11). Поскольку такого быть не может, то это говорит о более низкой концентрации ионов неодима в данном стекле:  $\rho_{\text{Nd}(2)} \approx 3,25 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>.

Этим же фактом, вероятно, объясняется различие не только по величине полученных значений  $\sigma_0$  (см. табл. 3), но и по длительности затухания люми-

несценции  $\tau_{\text{л}}$  (см. табл. 2): в образце № 1  $\tau_{\text{л}} \approx 285$  мкс, а в образце № 2  $\tau_{\text{л}} \approx 310$  мкс. Несколько различаются и составы образцов КНФС3-3,5:  $K(800 \text{ нм}) \approx 1,13$  при среднем  $K(\lambda_i) \approx 1,08$ . При этом образец № 2 оказался ближе к N31 ( $K(\lambda_i) = \sigma_{\text{abs}}^{\text{КНФС3}\text{№}2} / \sigma_{\text{abs}}^{\text{N31}} \approx 0,915 \pm 0,013$ ), но также демонстрирует заметное отклонение от заданной концентрации.

Следует также отметить более высокое содержание ионов Pt<sup>4+</sup> в образце № 2 стекла КНФС3-3,5, что приводит к снижению эффективности накачки в диапазоне длин волн 400 ÷ 500 нм.

### Заключение

Представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных характеристик лазерных неодимовых стекол на фосфатной основе: ГЛС-22, N31, КНФС3-3,5 (2 различные варки). На основе анализа данных сделаны следующие выводы:

– Наиболее узкими полосами люминесценции, а, соответственно, наибольшими значениями сечения вынужденных переходов  $\sigma_0$  при  $\lambda_0$  обладают стекла N31 и КНФС3-3,5.

– Образец № 2 КНФС3-3,5 существенно отличается от образца № 1: определенное при исследовании сечение поглощения во всем спектральном диапазоне оказалось в среднем на 8 % ниже. Это говорит о более низком содержании ионов неодима в образце КНФС3-3,5 № 2:  $\rho_{\text{Nd}(2)} \approx 3,25$  см<sup>-3</sup> (при условии, что для образца КНФС3-3,5 № 1  $\rho_{\text{Nd}(1)} = 3,5$  см<sup>-3</sup>).

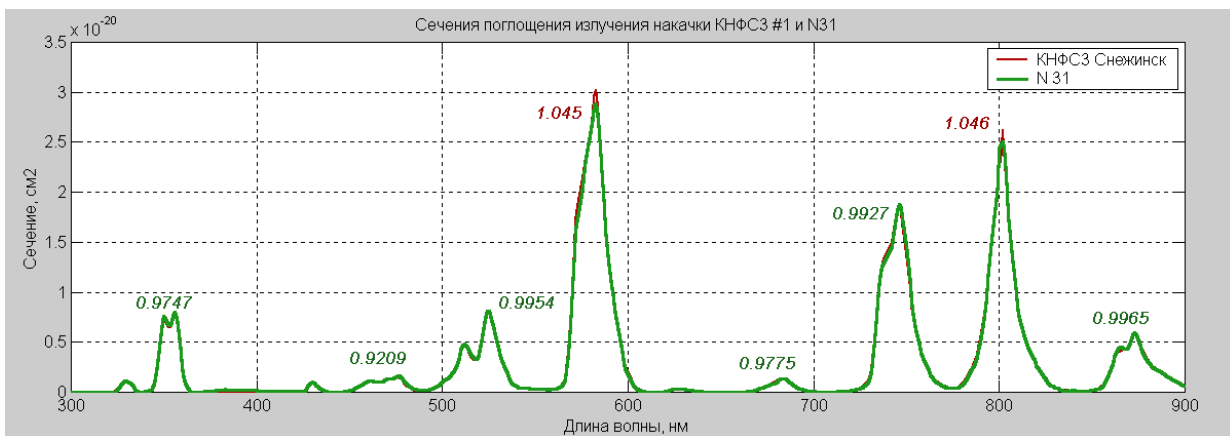


Рис. 10. Сечения поглощения неодимовых стекол КНФС3-3,5 (№ 1 для Снежинска) и N31; численные значения у максимумов равны  $K(\lambda_i) = \sigma_{abs}^{КНФС} / \sigma_{abs}^{N31}$

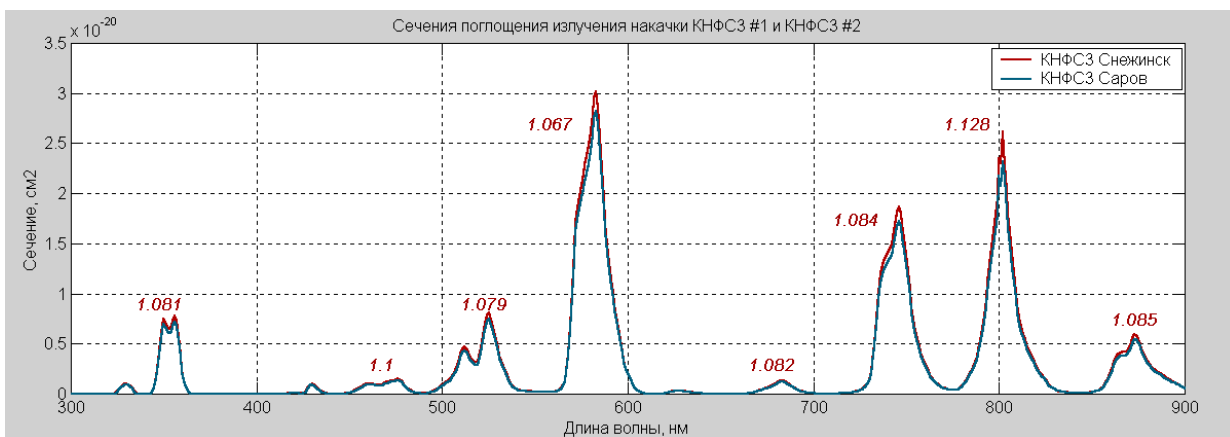


Рис. 11. Сечения поглощения КНФС3-3,5: № 1 – для Снежинска и № 2 – для Сарова; численные значения у максимумов равны  $K(\lambda_i) = \sigma_{abs}^{СНЕЖ} / \sigma_{abs}^{САРОВ}$

– Время затухания люминесценции стекла N31 – 335 мкс существенно превышает значение  $\tau_{л}$  образца № 2 стекла КНФС3-3,5 – 280 мкс. Такое большое различие может быть вызвано эффектом концентрационного тушения.

– Стекло N31 по совокупности лазерных параметров (точность соблюдения заданной концентрации, сечение вынужденных переходов  $\sigma_0 \sim 4 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ , длительность затухания люминесценции  $\tau_{л} \geq 330$  мкс, содержание  $Pt^{4+}$ ) более эффективно для использования в системах усиления по сравнению с образцами стекла КНФС3-3,5 № 1, 2 и, тем более, ГЛС22.

– Стекло ГЛС22 больше не производится, но его складские остатки являются значительными. Поэтому, несмотря на то, что по характеристикам оно уступает более современным КНФС3-3,5 и N31, ГЛС22 (21) все еще широко применяется в стержневых системах усиления.

## Список литературы

1. Ficini G., Campbell J. H. Development of large Scale Production of Nd-doped Phosphate Glasses for Megajoule-Scale Laser Systems. Preprint LLNL UCRL-JC-124027, May 1996.
2. George S. A., Hayden J. S. Spectroscopy of Nd-doped Laser Materials. Proc. Of SPIE. 2014. Vol. 8959, Solid State Lasers XXII;
3. www.perkinelmer.com.
4. Deutschbein O. K. IEEE J // Quantum Electronics. 1976. Vol. 12. P. 551.
5. Ред. Прохоров А. И. Справочник по лазерам. М.: Советское Радио, 1978. Т. 1.
6. Авакянц Л. И., Бужинский И. М., Корягина Е. И., Суркова В. Ф. Характеристики лазерных стекол, справочный обзор // Квантовая электроника. 1978. Вып. 5. № 4. С. 11.