

УДК 535.327

Прибор для измерения времени релаксации просветленного состояния оптических материалов методом «возбуждение-зондирование» в субмикросекундном диапазоне

Глазунов И.В.¹, Скопцов Н.А.¹, Маляревич А.М.¹, Юмашев К.В.¹, Лойко П.А.²

¹Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

²Королевский технологический институт,
SE-16440 Шиста, Швеция

Поступила 23.03.2016

Принята к печати 25.04.2016

Применение пассивных затворов для управления длительностью импульсов оптического излучения является актуальной задачей в миниатюрных и микрочип лазерах. Одной из ключевых спектроскопических характеристик, определяющих свойства материала, который может быть использован в качестве пассивного затвора, является время релаксации его просветленного состояния. В статье описан прибор для измерения времени релаксации просветленного состояния оптических материалов методом «возбуждение-зондирование» в субмикросекундном временном диапазоне. Представлены его структура и характеристики. Прибор позволяет измерять времена релаксации просветления у материалов, поглощающих на длине волны 1,5 мкм, т.е., в частности, у сред, легированных ионами кобальта Co^{2+} . Приведены результаты тестовых испытаний прибора, а также измерено время релаксации просветленного состояния нового материала – ситалла с кристаллической фазой $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$ – оно составило 190 ± 6 нс.

Ключевые слова: время релаксации просветленного состояния, метод «возбуждение-зондирование», ионы кобальта, ситалл, оксид галлия.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-24-31

Адрес для переписки:

Маляревич А.М.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: malyar@bntu.by

Address for correspondence:

Malyarevich A.M.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: malyar@bntu.by

Для цитирования:

Глазунов И.В., Скопцов Н.А., Маляревич А.М., Юмашев К.В.,
Лойко П.А.
Прибор для измерения времени релаксации просветленного состояния оптических материалов методом «возбуждение-зондирование» в субмикросекундном диапазоне.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 1. – С. 24–31.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-24-31

For citation:

Glazunov I.V., Skoptsov N.A., Malyarevich A.M., Yumashev K.V.,
Loiko P.A.
[Device for measurement of relaxation time of the bleached state of optical materials by the «pump-probe» method in sub- μs time domain].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 1, pp. 24–31 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-24-31

Введение

В современных лазерах используются различные устройства для управления характеристиками их излучения. Для управления длительностью лазерных импульсов могут использоваться активные и пассивные затворы. Преимущество пассивных затворов – отсутствие внешних управляющих устройств. Пассивные затворы – модуляторы – управляют длительностью лазерных импульсов вследствие изменения своего пропускания. Под воздействием мощного оптического излучения их начальное пропускание увеличивается (поглощение уменьшается и наступает «просветление»), что позволяет сформировать короткий лазерный импульс. Материалы с такими качествами называются просветляющимися средами. Одной из ключевых спектроскопических характеристик, определяющих свойства материала, который может быть использован в качестве пассивного затвора в лазере, является время релаксации его просветленного состояния τ [1, 2], т.е. такого состояния, когда его пропускание выше обычного.

Твердотельные лазерные среды – активные и пассивные – приобретают свои качества, как правило, благодаря легированию определенными ионами. Каждый ион характеризуется своей уникальной структурой уровней энергии. Для корректного описания сложной энергетической структуры ионов используются упрощенные модели. Представленная на рисунке 1 трехуровневая модель учитывает поглощение из основного состояния 1 (переход $1 \rightarrow 3$), наличие сверхбыстрого перехода $3 \rightarrow 2$ и время восстановления начального («обычного») поглощения τ за счет перехода $2 \rightarrow 1$. Поглощение изменяется из-за мощного оптического воздействия на длине волны, соответствующей переходу $1 \rightarrow 3$, которое переводит значительную часть ионов из основного состояния в возбужденное состояние 3 и вызывает уменьшение поглощения. Восстановление начального поглощения иначе называется релаксацией просветленного состояния. Оно может происходить как путем обратного перехода $3 \rightarrow 1$, так и через систему других состояний. В рамках модели это последовательный переход $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$. В общем случае время перехода $3 \rightarrow 2$ считается бесконечно коротким, а время жизни состояния 2 определяет время релаксации просветленного состояния материала τ .

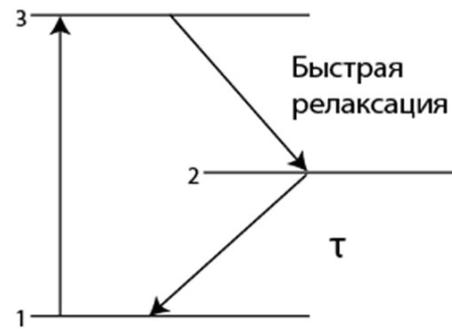


Рисунок 1 – Спектроскопическая модель просветляющихся сред

Figure 1 – Spectroscopic model of bleachable media

Время релаксации просветленного состояния можно измерять т.н. прямым методом – по времени затухания люминесценции, обусловленной переходами из долгоживущего (метастабильного) состояния (в модели на рисунке 1 ему соответствует уровень 2). Однако для достаточно большого количества материалов, используемых для пассивной модуляции добротности лазеров, квантовый выход люминесценции очень мал, так что зарегистрировать сигнал люминесценции не представляется возможным.

В этом случае для установления величины времени релаксации просветленного состояния используют метод «возбуждение-зондирование» [3]. В этом методе время τ определяется по кинетике восстановления поглощения после короткого мощного возбуждающего импульса оптического излучения при помощи слабого по мощности импульса зондирования. Зондирующий импульс «проверяет» степень поглощения и фиксирует пропускание материала в момент своего прихода через определенное время после мощного возбуждения. Для измерения разных по длительности величин τ используются разные реализации метода. Например, для измерения τ фемто- или пикосекундной длительности применяют метод оптического стробирования. Это метод задержки прихода зондирующего импульса в возбужденный материал с помощью изменения длины пути, который проходит этот импульс в пространстве по сравнению с возбуждающим. Однако для наносекундных характеристических времен τ этот способ неприемлем, поскольку за 1 нс свет проходит в воздухе путь, равный 30 см, и для задержки зондирующего импульса на субмикросекундные времена необходимо создавать в пространстве протяженные (до десятков метров) линии.

В данной работе представлен прибор, который позволяет измерять время релаксации просветленного состояния оптических материалов в наносекундном временном диапазоне.

Принципиальное устройство измерителя

Измеритель состоит из следующих элементов и устройств (рисунок 2): лазерный источник импульсного возбуждающего излучения 1, лазерный источник зондирующего излучения 2, модулятор 3, зеркала 4, 8 и 10, фокусирующие линзы 5 и 9, ловушка для покидающего образец возбуждающего излучения 6, исследуемый образец 7, быстрый фотодетектор 11, сигнал с которого передается на осциллограф 12.

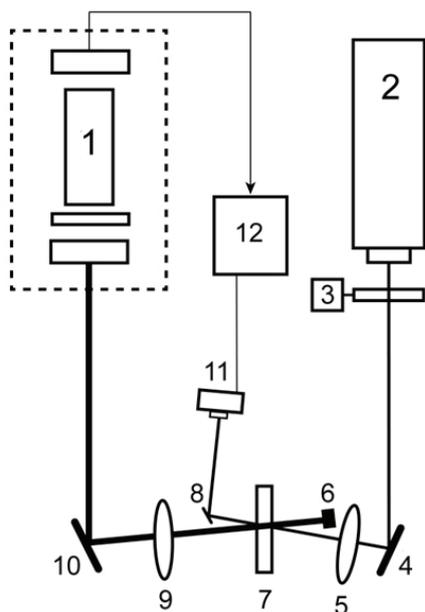


Рисунок 2 – Принципиальная схема прибора для измерения времени релаксации просветленного состояния оптических материалов: 1 – источник возбуждающего излучения; 2 – источник зондирующего излучения; 3 – модулятор с блоком питания; 4, 8, 10 – зеркала; 5, 9 – линзы; 6 – ловушка; 7 – образец; 11 – фотодетектор; 12 – осциллограф

Figure 2 – Principal scheme of the device for measuring of relaxation time of the bleached state for optical materials: 1 – source of excitation light; 2 – source of probe light; 3 – modulator with a power supply; 4, 8, 10 – mirrors; 5, 9 – lenses; 6 – light trap; 7 – sample; 11 – photodetector; 12 – oscilloscope

Возбуждающее излучение после отражения в поворотном зеркале 10 фокусировалось в исследуемый образец 7 линзой 9 с фокусным рас-

стоянием $f = 25$ мм. Диаметр сфокусированного пятна излучения составлял 160 мкм. При этом диаметр пучка зондирующего излучения на образце был 80 мкм, что обеспечивало требуемое в соответствии с методом «возбуждение-зондирование» соотношение размеров этих пучков (рисунок 3). Прошедшее через образец возбуждающее излучение поглощалось ловушкой 6, которая препятствует его выходу за пределы прибора.

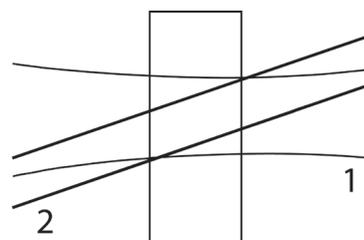


Рисунок 3 – Расположение в исследуемом образце возбуждающего (1) и зондирующего (2) пучков по методу «возбуждение-зондирование»

Figure 3 – Orientation of pump (1) and probe (2) beams in the studied sample for the «pump-probe» method

В качестве зондирующего используется излучение непрерывного лазера 2, которое прерывается механическим модулятором 3 с частотой единицы – сотни килогерц. Изменение частоты модуляции (т.е. продолжительности регистрации фотоприемником зондирующего сигнала) позволяет варьировать диапазон характерных длительностей времен релаксации просветления, которые можно измерять с помощью прибора, от единиц до сотен наносекунд. Зондирующее излучение после отражения в поворотном зеркале 4 фокусировалось в образец 7 линзой 5. Прошедшее образец зондирующее излучение направлялось зеркалом 8 на фотоприемник 11 (*Hamamatsu C 5460*), подключенный к цифровому осциллографу 12 производства фирмы *Gwinstek*.

Прибор для измерения времени релаксации просветления материалов с ионами Co^{2+}

В описанном выше измерителе выбор длин волн возбуждения и зондирования, а также частоты модуляции зондирующего сигнала позволяет проводить измерения времен релаксации просветленного состояния материалов, легированных различными ионами. В данной работе описан прибор, предназначенный для

измерения величины τ в материалах с ионами кобальта Co^{2+} .

Структура уровней энергии тетракоординированного иона кобальта Co^{2+} представлена на рисунке 4.

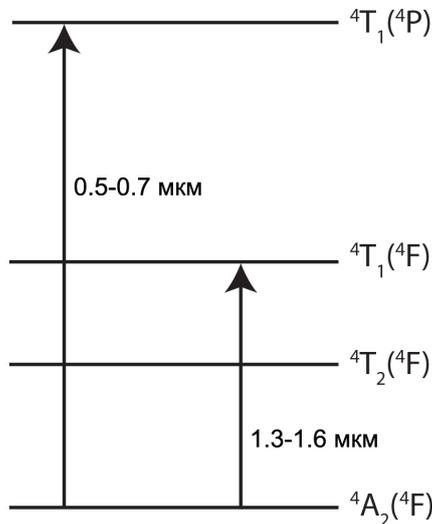


Рисунок 4 – Структура уровней энергии тетракоординированного иона кобальта Co^{2+}

Figure 4 – Scheme of energy levels of Co^{2+} ions in tetrahedral field

Видно, что возбуждение в области длин волн 1,3–1,6 μm (переход ${}^4A_2(4F) \rightarrow {}^4T_1(4F)$) приводит к уменьшению поглощения для всех переходов из основного состояния ${}^4A_2(4F)$ и, следовательно, для перехода ${}^4A_2(4F) \rightarrow {}^4T_1(4P)$ в области длин волн 0,5–0,7 μm . В разработанном приборе источником возбуждающего излучения (рисунок 2, элемент 1) служит лазер на основе стекла с ионами Er^{3+} и Yb^{3+} (длина волны излучения – 1,54 μm). Зондирование осуществляется излучением гелий-неонового лазера на длине волны 632,8 нм, которое модулируется с частотой 1 кГц. Зондирующее излучение регистрирует изменение количества ионов Co^{2+} в основном состоянии по изменению поглощения из этого состояния для перехода ${}^4A_2(4F) \rightarrow {}^4T_1(4P)$ по сравнению с «обычным» поглощением. В момент прихода в образец возбуждающего импульса фотоприемник регистрирует увеличение достигшей его мощности зондирующего излучения (пропускание материала возрастает, см. рисунок 5).

В дальнейшем регистрация фотоприемником изменения мощности зондирующего излучения во времени позволяет фиксировать кинетику изменения поглощения и определять

величину времени релаксации просветленного состояния τ .

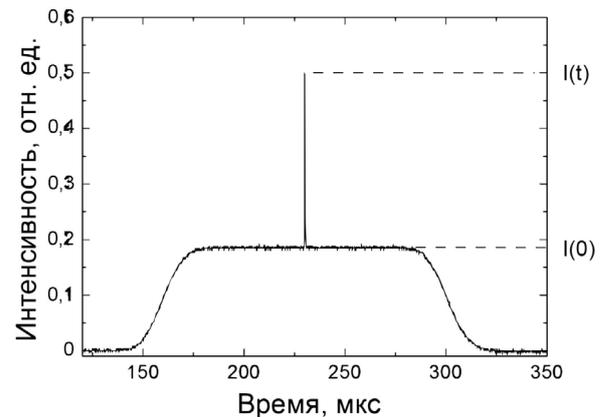


Рисунок 5 – Изменение регистрируемого фотоприемником сигнала во времени. Острый выброс на фоне модулированного сигнала представляет собой изменение пропускания материала вследствие его просветления и последующую релаксацию просветленного состояния

Figure 5 – Variation of the signal measured by the photodetector with time. Sharp spike on the modulated signal represents variation of the sample transmission due to its bleaching and subsequent relaxation of the bleached state

В качестве источника возбуждающего излучения использовался созданный лазер с активным элементом на основе фосфатного стекла, активированного ионами эрбия Er^{3+} и иттербия Yb^{3+} (Kigre QE-7s), который имел форму стержня длиной 50 мм и диаметром 3 мм. Резонатор лазера длиной 165 мм был образован «глухим» сферическим зеркалом с радиусом кривизны $R = 1$ м и плоским выходным с пропусканием $T = 10\%$. Активный элемент располагался на расстоянии 50 мм от «глухого» зеркала, между активным элементом и выходным зеркалом располагался пассивный затвор. Пассивный затвор с просветляющими покрытиями на рабочих поверхностях был изготовлен из кристалла алюмомагниевого шпинели с ионами кобальта $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ и имел начальное пропускание $T = 82\%$ на длине волны лазерной генерации 1,54 μm . В такой конфигурации резонатора лазер с частотой 1 Гц генерировал импульсы излучения длительностью 85 нс и энергией 2,4 мДж.

Результаты измерений

Прибор проверялся на соответствие получаемых с его помощью результатов литератур-

ным данным. В качестве тестового материала был выбран кристалл алюмомагниевого шпинели $MgAl_2O_4$, легированной ионами кобальта Co^{2+} . Экспериментальные данные показали моноэкспоненциальный характер релаксации просветления, поэтому они моделировались зависимостью:

$$\Delta\alpha(t) = A \exp(-t / \tau),$$

где изменение во времени t коэффициента поглощения $\Delta\alpha = \alpha_0 - \alpha(t) = \ln(I(t)/I_0)$; α_0 – начальный (в невозбужденном состоянии) коэффициент поглощения; I – интенсивность регистрируемого фотоприемником зондирующего излучения (рисунок 5); A – числовой коэффициент. Измеренное время релаксации просветленного состояния составило $\tau = 320 \pm 10$ нс (рисунок 6), что согласуется с данными для $Co^{2+}:MgAl_2O_4$ из работ [4, 5].

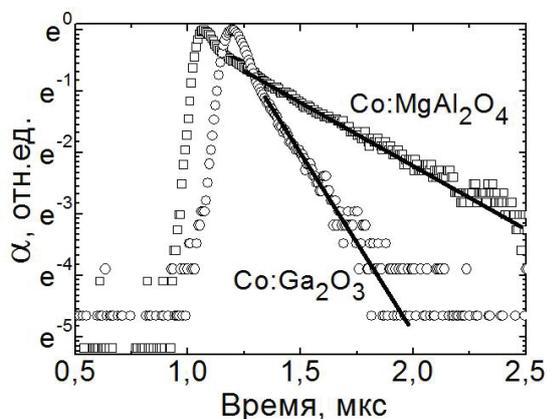


Рисунок 6 – Кинетика релаксации просветленного состояния образцов, легированных ионами Co^{2+} : алюмомагниевого шпинели $MgAl_2O_4$ и ситалла с кристаллической фазой Ga_2O_3 (точки – экспериментальные данные; линии – результаты моделирования в приближении моноэкспоненциальной зависимости)

Figure 6 – Kinetics of relaxation of the bleached state for the samples doped with Co^{2+} ions: magnesium aluminum spinel $MgAl_2O_4$ and glass-ceramics with the Ga_2O_3 crystalline phase (points – experimental data; lines – modeling with a single-exponential law)

С помощью созданного прибора проведены измерения для нового материала – ситалла с кристаллической фазой $Co^{2+}:Ga_2O_3$, изготовленного в НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова». Недавно было показано, что этот материал позволяет осуществлять пассивную модуляцию добротности эрбиевого лазера с диодной накачкой [6]. В этой же работе описаны кристаллографические характеристики и спектр поглощения данного

материала. На рисунке 6 приведены экспериментальные данные по релаксации просветления и результаты их моноэкспоненциальной аппроксимации. На основании моделирования время релаксации просветленного состояния у исследованного материала составило $\tau = 190 \pm 6$ нс. Полученный результат лежит в том же временном диапазоне, что и литературные данные для ионов кобальта в оксидных матрицах (см. таблицу).

Таблица / Table

Время релаксации просветленного состояния τ ионов Co^{2+} в оксидных материалах
Relaxation time of the bleached state τ of Co^{2+} ion in oxide materials

Материал с ионами Co^{2+} / Material with Co^{2+} ions	τ , нс / τ , ns	Источник / Reference
Монокристалл / Single crystal		
$MgAl_2O_4$	200÷350	[4, 5]
$LiGa_5O_8$	130	[7]
$LaMgAl_{11}O_{19}$	220	[7]
$ZnGa_2O_4$	350	[8]
Ситалл с кристаллической фазой / Glass-ceramics with crystalline phase		
$MgAl_2O_4$	120÷300	[9]
$ZnGa_2O_4$	700÷1000	[10]
ZnO	890	[11]
Zn_2SiO_4	830	[12]
Ga_2O_3	190	Данная работа / This work

Заключение

Разработан прибор для измерения времени релаксации просветленного состояния оптических материалов. В основу работы измерителя положен метод «возбуждение-зондирование». В состав измерителя входят лазерные источники возбуждающего и зондирующего излучения, блок образцов и система регистрации.

Прибор позволяет измерять время релаксации просветления субмикросекундного диапазона для материалов, поглощающих на длине волны 1,54 мкм. С его помощью определено время

релаксации просветленного состояния у алюмосиликатного ситалла с кристаллической фазой $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$, которое составило 190 ± 6 нс.

Список использованных источников

1. Пилипович, В.А. Оптические квантовые генераторы с просветляющимися фильтрами / В.А. Пилипович, А.А. Ковалев. – Минск : Наука и техника, 1975.

2. Маляревич, А.М. Твердотельные просветляющиеся среды / А.М. Маляревич, К.В. Юмашев. – Минск : Изд. БНТУ, 2008. – 204 с.

3. Сверхкороткие световые импульсы / под ред. С. Шапиро, пер. с англ. – М. : Мир, 1981. – 456 с.

4. Denker, B. The efficient saturable absorber for $1.54 \mu\text{m}$ Er:glass lasers / B. Denker [et al.] // *Advanced Solid State Lasers*, Seattle, USA, January 1999. M.M. Fejer [et al.], Eds. – OSA TOPS Proceedings. – 1999. – Vol. 26. – P. 618–620.

5. Yumashev, K.V. Nonlinear absorption properties of $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal / K.V. Yumashev [et al.] // *Applied Physics B*. – 2000. – Vol. 70, no. 2. – P. 179–184.

6. Loiko, P.A. Glass-ceramics with $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$ nanocrystals: Saturable absorber for $1.5\text{--}1.7 \mu\text{m}$ Er lasers / P.A. Loiko [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2015. – Vol. 12. – P. 035803-1–5.

7. Yumashev, K.V. Excited state absorption and passive Q-switch performance of Co^{2+} doped oxide crystals /

K.V. Yumashev [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2002. – Vol. 341, no. 1. – P. 366–70.

8. Duan, X.L. Synthesis and optical properties of transparent $\text{ZnO-Ga}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass-ceramics embedded with cobalt-doped nanocrystals / X.L. Duan [et al.] // *Nanotechnology*. – 2007. – Vol. 18, no. 17. – P. 175609.

9. Malyarevich, A.M. Optical absorption and luminescence study of cobalt-doped magnesium aluminosilicate glass-ceramics / A.M. Malyarevich, I.A. Denisov, K.V. Yumashev, O.S. Dymshits, A.A. Zhilin // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2002. – Vol. 19, no. 8. – P. 1815–1821.

10. Denisov, I.A. Linear and nonlinear optical properties of cobalt-doped zinc aluminum glass ceramics / I.A. Denisov [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – Vol. 93. – P. 3827–3831.

11. Скопцов, Н.А. Новая просветляющаяся среда на основе стеклокерамики с нанокристаллами $\text{Co}^{2+}:\text{ZnO}$ для инфракрасных лазеров / Н.А. Скопцов [и др.] // Матер. 7-й междунаучно-техн. конф. «Приборостроение–2014» (19–21 ноября 2014 г.). – Минск : Изд. БНТУ, 2014. – С. 381–382.

12. Глазунов, И.В. Спектроскопические свойства ситаллов, содержащих нанокристаллы $\text{Co}^{2+}:\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ / И.В. Глазунов [и др.] // Матер. 8-й Междунаучно-техн. конф. «Приборостроение–2015» (25–27 ноября 2015 г.). – Минск : Изд. БНТУ, 2015. – Т. 2. – С. 43–45.

Device for measurement of relaxation time of the bleached state of optical materials by the «pump-probe» method in sub- μ s time domain

Glazunov I.V.¹, Skoptsov N.A.¹, Malyarevich A.M.¹, Yumashev K.V.¹, Loiko P.A.²

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

²KTH – Royal Institute of Technology,
SE-16440 Kista, Sweden

Received 23.03.2016

Accepted for publication 25.04.2016

Abstract. The use of passive shutters to control the duration of the light pulses is an important aspect in the miniature and microchip lasers. One of the key spectroscopic characteristics which determine the properties of the material, which can be used as a passive shutter is relaxation time of its bleached state. We describe a device for determination of relaxation time of the bleached state in optical materials by the «pump-probe» method in the sub- μ s time domain. This device allows one to determine relaxation times for materials which absorb at the light wavelength of 1.5 μ m, e.g., materials doped with cobalt ions Co^{2+} . The results of test examinations of the device are described, and the relaxation time of the bleached state of Co^{2+} ions is measured for a novel material – transparent glass-ceramics with $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$ nanophase – amounting to 190 ± 6 ns.

Keywords: relaxation time of the bleached state, «pump-probe» method, cobalt ions, glass-ceramics, gallium oxide.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-24-31

Адрес для переписки:

Малыаревич А.М.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: malyar@bntu.by

Address for correspondence:

Malyarevich A.M.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: malyar@bntu.by

Для цитирования:

Глазунов И.В., Скопцов Н.А., Малыаревич А.М., Юмашев К.В.,
Лойко П.А.
Прибор для измерения времени релаксации просветленного состояния оптических материалов методом «возбуждение-зондирование» в субмикросекундном диапазоне.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 1. – С. 24–31.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-24-31

For citation:

Glazunov I.V., Skoptsov N.A., Malyarevich A.M., Yumashev K.V.,
Loiko P.A.
[Device for measurement of relaxation time of the bleached state of optical materials by the «pump-probe» method in sub- μ s time domain].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 1, pp. 24–31 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-24-31

References

1. Pilipovich V.A., Kovalev A.A. *Optycheskhiye kvantovye generatory s prosvetlyayuschimisya fil'trami* [Optical quantum generators with bleached filters], Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1975 (in Russian).
2. Malyarevich A.M., Yumashev K.V. *Tverdotel'nye prosvetlyayuschiesya sredy* [Solid-state bleachable media]. Minsk, BNTU Publ., 2008, 204 p. (in Russian).
3. Sverkhkorotkie svetovye impulsy [Ultrashort Light Pulses. Picosecond Techniques and Applications]. Edited by S.L. Shapiro. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1977, 386 p.
4. Denker B., Galagan B., Godovikova E., Meilman M., Osiko V., Sverchkov S., Kertesz I. The efficient saturable absorber for 1.54 μm Er:glass lasers. *Advanced Solid State Lasers, Seattle, USA, January 1999*. M.M. Fejer, Ed. OSA TOPS Proceedings, 1999, vol. 26, pp. 618–620.
5. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Prokoshin P.V., Mikhailov V.P. Nonlinear absorption properties of $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal. *Applied Physics B.*, 2000, vol. 70, no. 2, pp. 179–184.
6. Loiko P.A., Skoptsov N.A., Yumashev K.V., Glazunov I.V., Malyarevich A.M., Dymshits O.S., Zhilin A.A., Alekseeva I.P., Zapalova S.S., Vitkin V.V., Kharitonov A.A. Glass-ceramics with $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Co}^{2+}$ nanocrystals: Saturable absorber for 1.5–1.7 μm Er lasers. *Laser Physics Letters*, 2015, vol. 12, pp. 035803-1–5.
7. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Kuleshov N.V., Moncorge R. Excited state absorption and passive Q-switch performance of Co^{2+} doped oxide crystals. *Journal of Alloys and Compounds*, 2002, vol. 341, no. 1, pp. 366–70.
8. Duan X.L., Yuan D.R., Cheng X.F., Yu F.P., Liu Z.Q., Zhang X.Q. Synthesis and optical properties of transparent $\text{ZnO-Ga}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass-ceramics embedded with cobalt-doped nanocrystals. *Nanotechnology*, 2007, vol. 18, no. 17, pp. 175609.
9. Malyarevich A.M., Denisov I.A., Yumashev K.V., Dymshits O.S., Zhilin A.A. Optical absorption and luminescence study of cobalt-doped magnesium aluminosilicate glass-ceramics. *Journal of the Optical Society of America B.*, 2002, vol. 19, no. 8, pp. 1815–1821.
10. Denisov I.A., Volk Yu.V., Malyarevich A.M., Yumashev K.V., Dymshits O.S., Zhilin A.A., Kung Uk, Lee Kyeong-Hee. Linear and nonlinear optical properties of cobalt-doped zinc aluminum glass ceramics. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 93, pp. 3827–3831.
11. Skoptsov N.A., Glazunov I.V., Malyarevich A.M., Yumashev K.V., Dymshits O.S., Zhilin A.A., Alekseeva I.P., Shemchyk D.V. [Novel bleachable medium based on glass-ceramics with $\text{Co}^{2+}:\text{ZnO}$ nanocrystals for near-IR lasers]. *Proceedings of 7th Intl. Scientific and Technical Conf. «Instrumentation Engineering–2014» (19–21 November 2014)*. Minsk, BNTU Publ., 2014, pp. 381–382 [in Russian].
12. Glazunov I.V., Skoptsov N.A., Malyarevich A.M., Yumashev K.V., Dymshits O.S., Zhilin A.A., Alekseeva I.P., Shemchyk D.V. [Spectroscopic properties of glass-ceramics containing $\text{Co}^{2+}:\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ nanocrystals] *Proceedings of 8th Intl. Scientific and Technical Conf. «Instrumentation Engineering–2015» (25–27 November 2015)*. Minsk, BNTU Publ., 2015, vol. 2, pp. 43–45 (in Russian).