

ИЗБРАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ XXXII ШКОЛЫ ПО ГОЛОГРАФИИ. ЧАСТЬ II PROCEEDINGS OF THE XXXII SCHOOL ON HOLOGRAPHY. PART II

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1025-1030

УДК 535.343

Импульсная запись динамических голограмм в кристалле силиката висмута при изменении длины волны лазерного излучения

Иван Геннадьевич Даденков¹✉, Алексей Леонидович Толстик²,
Юрий Иванович Миксюк³, Константин Алексеевич Саечников⁴

^{1,2} Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Республика Беларусь

^{3,4} Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, Минск, 220050, Республика Беларусь

¹ dadenkov.ivan@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-0722-4683>

² tolstik@bsu.by, <https://orcid.org/0000-0003-4953-4890>

³ miksiuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3969-0454>

⁴ ska-bspu@tut.by, <https://orcid.org/0000-0001-8591-9312>

Аннотация

Предмет исследования. Исследован процесс формирования динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле силиката висмута наносекундными лазерными импульсами при изменении длины волны излучения. Предложена оригинальная схема записи голограмм для сохранения периода решетки при работе на разных длинах волн. **Метод.** Применен метод импульсной записи динамических решеток на основе предложенной оптической схемы, который обеспечивает выполнение условия Брэгга для зондирующего излучения. Оригинальность схемы заключается в использовании первых порядков дифракции пропускающей дифракционной решетки в качестве опорной и сигнальной волн, а также телескопической системы, примененной для фиксации периода записываемой решетки независимо от используемой длины волны. **Основные результаты.** Получены кинетические зависимости дифракционной эффективности динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле силиката висмута при изменении длины волны записываемого излучения в актуальном спектральном диапазоне (от 450 до 600 нм). Установлен эффект проявления конкурирующих механизмов записи коротко- (сотни микросекунд) и долгоживущих (секунды) решеток, вклад которых зависит от длины волны записываемого голограмму излучения. Определена оптимальная длина волны для получения наибольшей дифракционной эффективности голограмм. Показано, что излучение в сине-зеленой области спектра приводит к преимущественной записи короткоживущей решетки, в то время как в красной области спектра доминируют долгоживущие решетки. **Практическая значимость.** Необходимость исследований фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов определена их применением для мультиплексной записи динамических голограмм и реализации метода адаптивной интерферометрии для отслеживания изменений объектов в реальном времени.

Ключевые слова

динамические голограммы, фоторефрактивные кристаллы, силикат висмута, импульсная голография, дифракционная эффективность, перестройка длины волны

Ссылка для цитирования: Даденков И.Г., Толстик А.Л., Миксюк Ю.И., Саечников К.А. Импульсная запись динамических голограмм в кристалле силиката висмута при изменении длины волны лазерного излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1025–1030. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1025-1030

Pulse recording of dynamic holograms in bismuth silicate crystal in a broad wavelength range

Ivan G. Dadenkov^{1✉}, Alexei L. Tolstik², Yuri I. Miksiuk³, Konstantin A. Saechnikov⁴

^{1,2} Belarussian State University, Minsk, 220030, Republic of Belarus

^{3,4} Belarussian State Pedagogical University named after Maxim Tank, Minsk, 220050, Republic of Belarus

¹ dadenkov.ivan@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-0722-4683>

² tolstik@bsu.by, <https://orcid.org/0000-0003-4953-4890>

³ miksiuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3969-0454>

⁴ ska-bspu@tut.by, <https://orcid.org/0000-0001-8591-9312>

Abstract

The formation of dynamic holograms in a photorefractive bismuth silicate crystal by nanosecond laser pulses with a change in the radiation wavelength is studied. An original scheme for recording holograms is proposed to preserve the grating period when operating at different wavelengths. The method of pulsed recording of dynamic gratings based on the proposed optical scheme is applied, which ensures the fulfillment of the Bragg condition for probing radiation. The originality of the scheme lies in the use of the first orders of diffraction of a transmitting diffraction grating as the reference and signal waves, as well as a telescopic system used to fix the period of the recorded grating, regardless of the wavelength used. Kinetic dependences of the diffraction efficiency of dynamic holograms in a photorefractive bismuth silicate crystal are obtained with a change in the wavelength of recording radiation in the actual spectral range (from 450 nm to 600 nm). The effect of the manifestation of competing recording mechanisms of short-lived (hundreds of microseconds) and long-lived (seconds) gratings, the contribution of which depends on the wavelength of the radiation recording the hologram, has been established. The optimal wavelength for obtaining the highest diffraction efficiency of holograms is determined. It is shown that radiation in the blue-green region of the spectrum leads to the predominant recording of a short-lived grating, while long-lived gratings dominate in the red region of the spectrum. The need to study photorefractive crystals of the sillenite family is determined by their use for multiplex recording of dynamic holograms and the implementation of the adaptive interferometry method to track changes in objects in real time.

Keywords

dynamic holograms, photorefractive crystals, bismuth silicate, pulse holography, diffraction efficiency, wavelength tuning

For citation: Dadenkov I.G., Tolstik A.L., Miksiuk Yu.I., Saechnikov K.A. Pulse recording of dynamic holograms in bismuth silicate crystal in a broad wavelength range. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1025–1030 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1025-1030

Введение

Одно из существенных преимуществ фоторефрактивных кристаллов — возможность записи и перезаписи в них динамических голограмм, время жизни которых может изменяться от микросекунд до секунд и даже часов. Это определяет их использование в голографических системах записи, хранения и обработки информации, адаптивных интерферометрах и др. [1–5]. Физические процессы записи голограмм в фоторефрактивных кристаллах основаны на пространственном перераспределении зарядов в поле интерферирующих световых пучков по многочисленным центрам, имеющим разнообразную природу возникновения и характеристики. По своей энергетической структуре фоторефрактивные кристаллы семейства силленитов, в том числе исследуемый в настоящей работе кристалл силиката висмута, являются широкозонными полупроводниками. При этом существенное влияние на формирование голограмм оказывают примеси и структурные дефекты кристаллической решетки, приводящие к возникновению в запрещенной зоне донорных и акцепторных энергетических уровней [6–9]. Особенность кристаллов силленитов — одновременное существование долго- (секунды, часы) и короткоживущих ловушечных уровней (микро- и миллисекунды), которые могут быть заселены в результате поглощения лазерного излучения кристаллом в широком спектральном диапазоне [10–12]. При этом формирование фотоиндуцированного отклика, выражающегося в локальном изменении

показателя преломления и коэффициента поглощения, может быть реализовано с использованием как непрерывного лазерного излучения, так и под действием нано- и пикосекундных лазерных импульсов [13, 14]. В работах [15, 16] показано, что, проявление короткоживущих ловушечных уровней существенно зависит от интенсивности записывающего излучения. При небольших интенсивностях записываются долгоживущие решетки с временем жизни на уровне секунд, в то время как с увеличением интенсивности проявляются быстрые компоненты в диапазоне сотен микросекунд. Отметим, что исследования выполнены на одной длине волны 532 нм. Важный параметр для записи динамических голограмм — использование длины волны записывающего излучения, поскольку при использовании другой длины волны возможно проявление различных особенностей формирования и релаксации динамических решеток.

Цель данной работы — оптимизация спектральных условий импульсной записи голограмм в фоторефрактивном кристалле силиката висмута. Для достижения поставленной цели определены следующие задачи: измерить зависимости интенсивности дифрагированного сигнала от времени при использовании для записи импульсного лазерного излучения на разных длинах волн; определить время формирования и релаксации динамических решеток; установить оптимальные длины волн для записи коротко- и долгоживущих решеток. С целью оптимизации условий голографической записи выполнен анализ спектральных особенностей форми-

рования динамических голограмм при использовании лазерных импульсов на различных длинах волн в диапазоне от 450 до 600 нм.

Методика проведения эксперимента

Для исследования зависимости амплитудных и временных характеристик динамических голограмм в кристалле силиката висмута в качестве источника излучения, формирующего голограмму, использован параметрический генератор с длительностью лазерных импульсов 10 ± 1 нс и шириной линии генерации $\delta\lambda$ менее 0,1 нм в видимой области спектра. Параметрический генератор возбужден излучением третьей гармоники Nd:YAG лазера. Зондирование области записи голограммы проведено излучением непрерывного гелий-неонового лазера мощностью в несколько милливатт. Использование данного лазера в качестве зонда способствовало непрерывному контролю за процессами формирования и релаксации записываемых голограмм. Разработана оригинальная схема записи (рис. 1), основанная на использовании дифракционной решетки с известным периодом и телескопической системы, фокусирующей первые порядки дифракции на исследуемый кристалл. Отличительная особенность данной схемы: при изменении длины волны записывающего излучения изменяется угол между пучками, дифрагированными в плюс/минус первые порядки, что приводит к автоматической подстройке и сохранению периода формируемой голографической решетки независимо от длины волны падающего излучения. В этом случае имеет место автоматическое выполнение условия Брэгга для восстанавливающего светового пучка при изменении длины волны записывающего излучения. Наблюдение

за кинетикой релаксации записанной голограммы осуществлено при помощи *p-i-n* фотодиода и цифрового осциллографа. Параметрический генератор позволил получить импульсное лазерное излучение в диапазоне от 400 нм до 2 мкм с шагом изменения 0,1 нм, что дает возможность работать во всем спектральном диапазоне, актуальном для кристаллов семейства силленитов (450–600 нм). В данном интервале для кристалла силиката висмута имеет место эффект фотоиндуцированного поглощения, однако, при использовании для записи голограмм одиночных лазерных импульсов с фиксированием энергии на уровне 1 мДж, формируемая этим эффектом амплитудная решетка оказывает пренебрежимо малое влияние на общую дифракционную эффективность голограммы. Выбор коротковолновой границы диапазона 450 нм обусловлен высоким поглощением излучения в кристалле силиката висмута при приближении к длине волны, отвечающей прямым межзонным переходам. В этом случае замечено нарушение условия объемности формируемой дифракционной решетки, и голограмма записана не в объеме кристалла, а в приграничном слое. Такое нарушение связано с тем, что эффективная глубина проникновения излучения в кристалл силиката висмута, согласно закону Бугера, меньше фактической толщины кристалла, и это приводит к тому, что параметр Клейна Q меньше 10. При этом голограмма записана не во всем объеме кристалла, а в приповерхностном слое. Длинноволновая граница выбранного диапазона обусловлена снижением дифракционной эффективности и чувствительности кристаллов при записи голограмм в красной области спектра.

Результат проведенного эксперимента — получение набора осциллограмм, снятых при различных времен-

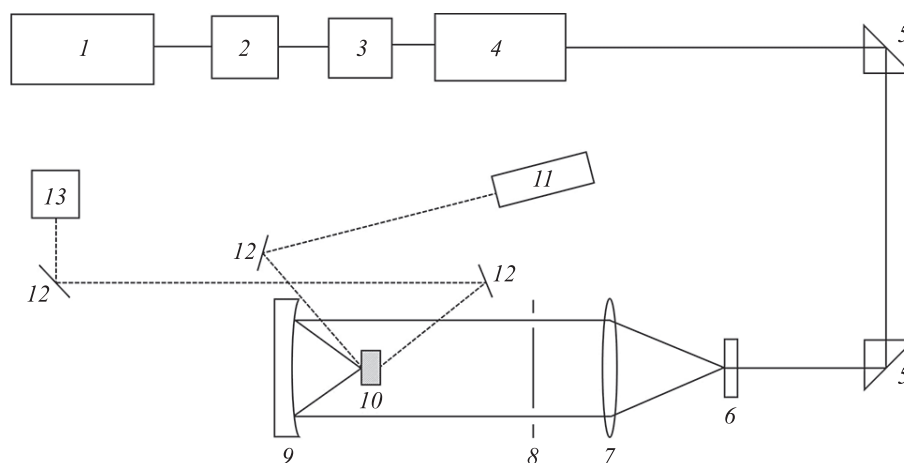


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — импульсный лазер на иттрий-алюминиевом гранате с ионами неодима; 2 — генератор второй гармоники на кристалле KDP; 3 — генератор третьей гармоники на кристалле LBO; 4 — параметрический генератор на кристалле BBO; 5 — призма полного внутреннего отражения; 6 — дифракционная решетка; 7 — собирающая линза с $f = 350$ мм; 8 — диафрагма; 9 — сферическое зеркало с $f = 80$ мм; 10 — кристалл силиката висмута с линейными размерами $10 \times 10 \times 2$ мм; 11 — непрерывный гелий-неоновый лазер; 12 — зеркало; 13 — фотоприемное устройство

Fig. 1. Scheme of the experimental setup, where 1 — pulsed yttrium-aluminum garnet laser with neodymium ions; 2 — second harmonic generator on a KDP crystal; 3 — third harmonic generator on an LBO crystal; 4 — parametric generator on a BBO crystal; 5 — prism total internal reflection; 6 — diffraction grating; 7 — converging lens with $f = 350$ mm; 8 — diaphragm; 9 — spherical mirror with $f = 80$ mm; 10 — bismuth silicate crystal with linear dimensions $10 \times 10 \times 2$ mm; 11 — continuous helium-neon laser; 12 — mirror; 13 — photodetector

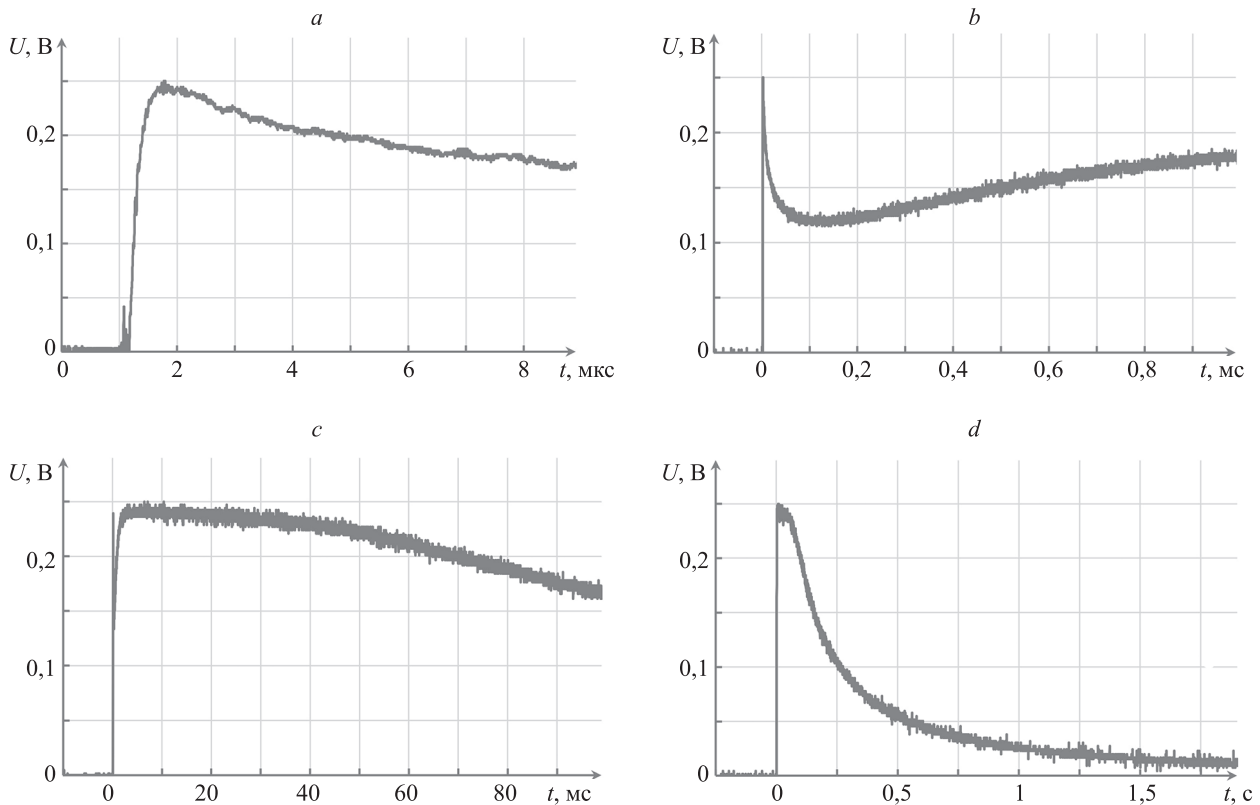


Рис. 2. Осциллограммы формирования и релаксации записанной голограммы, полученные путем наблюдения за дифрагированным лучом гелий-неонового лазера, с временными разрешениями: 250 нс (а), 50 мкс (б), 5 мс (с), 100 мс (д), при освещении кристалла лазерным импульсом параметрического генератора с длиной волны 510 нм и интенсивностью 1 МВт/см^2 , где U — напряжение, t — время

Fig. 2. Oscillograms of the formation and relaxation of the recorded hologram obtained by observing the diffracted beam of a helium-neon laser, with time resolutions: 250 ns (a), 50 ms (b), 5 ms (c), 100 ms (d), when the crystal is illuminated by a laser pulse of a parametric generator with a wavelength of 510 nm and an intensity of 1 MW/cm^2 , where U is the voltage, t is the time

ных разрешениях (рис. 2). Изменение разрешений необходимо, так как при импульсной записи формируются коротко- и долгоживущие голограммы с временами жизни, отличающимися на несколько порядков.

Результаты и обсуждение

Дифракционные эффективности (рис. 3), нормированы на максимальное значение, полученное в ходе экспериментов. Видно, что дифракционная эффективность (η) долгоживущей решетки практически не зависит от длины волны излучения (λ), формирующей голограмму, в то время как короткоживущая решетка имеет максимум на длине волны 470 нм. Это связано с тем, что при толщине исследуемого кристалла, равной 2 мм, на этой длине волны происходит наиболее эффективное поглощение падающего излучения в объеме кристалла. При использовании излучения с меньшей длиной волны голограмма будет записываться в слое с меньшей толщиной, чем исследуемый кристалл, а при использовании излучения с большей длиной волны — заметная часть излучения будет проходить через кристалл, не испытывая поглощение.

На рис. 3 (с, d) представлены зависимости времени формирования коротко- и долгоживущей решеток от длины волны записывающего излучения. Видно, что время записи короткоживущей решетки находится на уровне нескольких сотен наносекунд, в то время как для долгоживущей решетки это время составляет несколько миллисекунд. Из представленных зависимостей также можно сделать вывод, что в коротковолновой области спектра время формирования короткоживущей решетки максимальное, в то время как долгоживущей — минимальное. При продвижении в длинноволновую область спектра время формирования стабилизируется примерно на одном уровне для обеих решеток.

Различия в поведении динамических решеток дают основания предположить разные физические механизмы их формирования: короткоживущая решетка обусловлена локальным перераспределением электронов по ловушечным уровням, в то время как долгоживущая решетка связана с диффузией электронов по объему кристалла и формированием фоторефрактивного отклика за счет генерации электрического поля внутри кристалла.

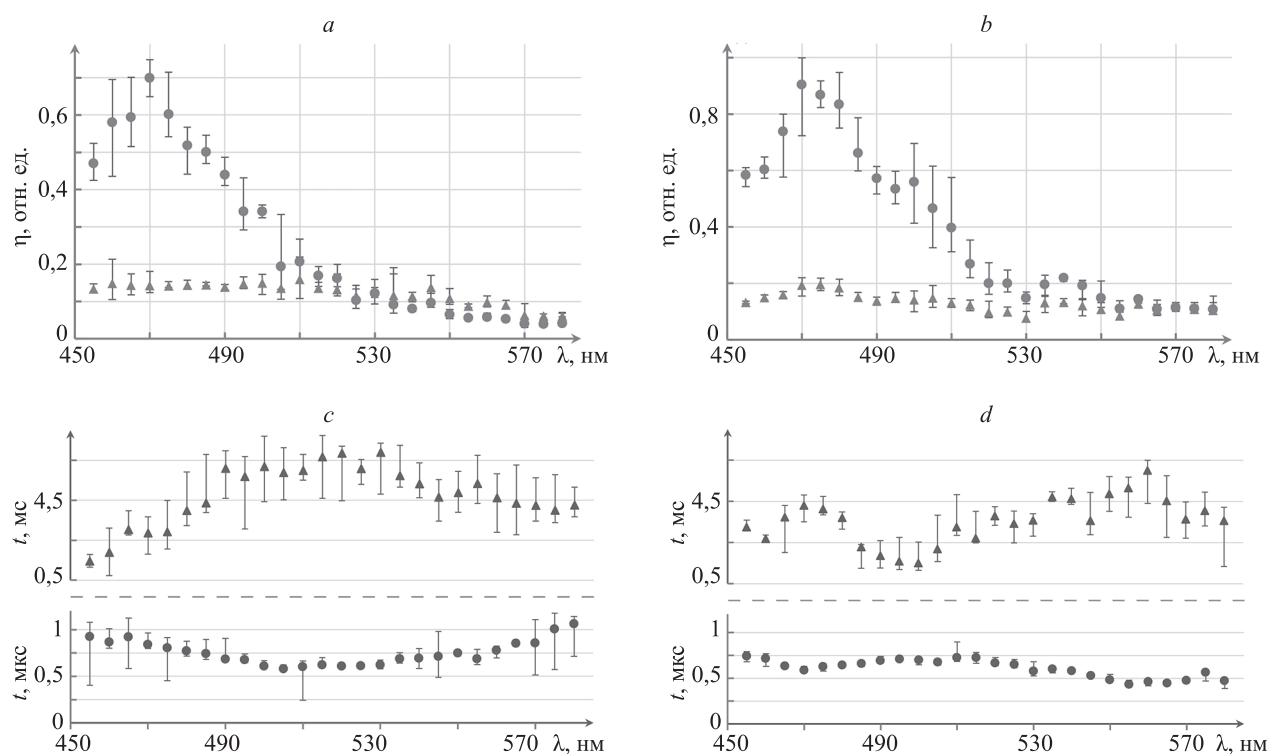


Рис. 3. Зависимости относительной дифракционной эффективности (η) (a, b) и времени формирования (t) (c, d) для коротко- и долгоживущих решеток, полученных при освещении кристалла лазерным импульсом параметрического генератора, от длины волны записывающего излучения при интенсивностях: 1 МВт/см² (a, c) и 5 МВт/см² (b, d).

Обозначения кривых: ● — коротко- и ▲ — долгоживущая решетки

Fig. 3. Dependences of the relative diffraction efficiency (η) (a, b) and formation time (t) (c, d) for short- and long-lived gratings obtained by illuminating the crystal with a laser pulse of a parametric generator on the recording radiation wavelength at intensities: 1 MW/cm² (a, c) and 5 MW/cm² (b, d).

Curve designations: ● — short- and ▲ — long-lived gratings

Закключение

В работе показана возможность оптимизации условий записи голограмм импульсным лазером в спектральном диапазоне от 450 до 600 нм в кристалле силиката висмута. В ходе экспериментального исследования установлена выраженная спектральная зависимость эффективности формирования коротко- и долгоживущих динамических решеток в фоторефрактивных кристаллах силиката висмута, используемых в системах адаптивной интерферометрии. В результате решения задачи установления времени формирования и релаксации динамических решеток в кристалле силиката висмута определено, что в синей области спектра

(450–500 нм) доминирующими являются короткоживущие решетки с временами жизни на уровне сотни микросекунд. При смещении длины волны записывающего излучения в длинноволновую область спектра их дифракционная эффективность уменьшается, и доминирующими становятся долгоживущие решетки с временем жизни в несколько секунд. Определена оптимальная длина волны для записи динамических решеток в силикате висмута, которая составила 470 нм при толщине кристалла 2 мм. При записи на этой длине волны формируемые динамические голограммы имели наибольшую дифракционную эффективность при фиксированной энергии лазерных импульсов на уровне 1 мДж.

Литература

1. Петров М., Степанов С., Хоменко А. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992. 317 с.
2. Шепелевич В.В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах. Мозырь: УО МГПУ им. И.П. Шамякина, 2012. 287 с.
3. Shandarov S.M., Burimov N.I., Kul'chin Yu.N., Romashko R.V., Tolstik A.L., Shepelevich V.V. Dynamic Denisyuk holograms in cubic photorefractive crystals // *Quantum Electronics*. 2008. V. 38. N 11. P. 1059–1069. <https://doi.org/10.1070/QE2008v038n11ABEH013793>
4. Ромашко Р.В. Адаптивная голографическая интерферометрия: техника, прогресс и приложения // *Вестник Дальневосточного*

References

1. Petrov M., Stepanov S., Khomenko A. *Photorefractive Crystals in Coherent Optics*. St. Petersburg, 1992, 317 p. (in Russian)
2. Shepelevich V.V. *Holography in Photorefractive Optically Active Crystals*. Mazyr, Mazyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, 2012, 287 p. (in Russian)
3. Shandarov S.M., Burimov N.I., Kul'chin Yu.N., Romashko R.V., Tolstik A.L., Shepelevich V.V. Dynamic Denisyuk holograms in cubic photorefractive crystals. *Quantum Electronics*, 2008, vol. 38, no. 11, pp. 1059–1069. <https://doi.org/10.1070/QE2008v038n11ABEH013793>
4. Romashko R.V. Adaptive holographic interferometry: technique, progress and applications. *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian*

- отделения Российской академии наук. 2021. № 4. С. 40–47. https://doi.org/10.37102/0869-7698_2021_218_04_03
5. Peigné A., Bortolozzo U., Residori S., Molin S., Billault V., Nouchi P., Dolfi D., Huignard J. Adaptive interferometry for high-sensitivity optical fiber sensing // *Journal of Lightwave Technology*. 2016. V. 34. N 19. P. 4603–4609. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2552495>
 6. Каргин Ю.Ф., Бурков В.И., Марин А.А., Егорышева А.В. Кристаллы $\text{Bi}_{12}\text{Si}_x\text{O}_{20-8}$ со структурой силленита. Синтез, строение, свойства. М.: Изд-во ИОХ РАН, 2004. 312 с.
 7. Koc H., Palaz S., Simsek S., Mamedov A., Ozbay E. Elastic and optical properties of sillenites: First principle calculations // *Ferroelectrics*. 2020. V. 557. N 1. P. 98–104. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1713354>
 8. Толстик А.Л., Ханон Х.К. Динамика фотоиндуцированного поглощения в кристаллах титаната висмута // *Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика*. 2012. № 2. С. 3–7.
 9. Isik M., Delice S., Nasser H., Gasanly N.M., Darvishov N.H., Bagiev V.E. Optical characteristics of $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ single crystals by spectroscopic ellipsometry // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2020. V. 120. P. 105286. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105286>
 10. Kornienko T., Kisteneva M., Shandarov S., Tolstik A. Light-induced effects in sillenite crystals with shallow and deep traps // *Physics Procedia*. 2017. V. 86. P. 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.01.029>
 11. Tolstik A.L., Matusevich A.Yu., Kisteneva M.G., Shandarov S.M., Itkin S.I., Mandel' A.E., Kargin Yu.F., Kul'chin Yu.N., Romashko R.V. Spectral dependence of absorption photoinduced in a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystal by 532-nm laser pulses // *Quantum Electronics*. 2007. V. 37. N 11. P. 1027–1032. <https://doi.org/10.1070/QE2007v037n11ABEH013371>
 12. Noh T.H., Hwang S.W., Kim J.U., Yu H.K., Seo H., Ahn B., Kim D.W., Cho I. Optical properties and visible light-induced photocatalytic activity of bismuth sillenites ($\text{Bi}_{12}\text{XO}_{20}$, X = Si, Ge, Ti) // *Ceramics International*. 2017. V. 43. N 15. P. 12102–12108. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.067>
 13. Shandarov S.M., Kisteneva M.G., Akrestina A.S., Vishnev A.S., Kargin Yu.F., Tolstik A.L. Change in absorption induced in a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$: Ca crystal by 870-nm infrared radiation // *High Energy Chemistry*. 2008. V. 42. N 7. P. 554–556. <https://doi.org/10.1134/S0018143908070163>
 14. Matusevich A., Tolstik A., Kisteneva M., Shandarov S., Matusevich V., Kiessling A., Kowarschik R. Investigation of photo-induced absorption in a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystal // *Applied Physics B*. 2008. V. 92. N 2. P. 219–224. <https://doi.org/10.1007/s00340-008-3098-z>
 15. Stankevich A.V., Tolstik A.L., Hanon H.K. Photoinduced absorption in bismuth titanate crystals on nano- and picosecond excitation // *Technical Physics Letters*. 2011. V. 37. N 8. P. 746–749. <https://doi.org/10.1134/S1063785011080268>
 16. Dadenkov I.G., Tolstik A.L., Miksyuk Yu.I., Saechnikov K.A. Photoinduced absorption and pulsed recording of dynamic holograms in bismuth silicate crystals // *Optics and Spectroscopy*. 2020. V. 128. N 9. P. 1401–1406. <https://doi.org/10.1134/S0030400X20090052>
 - Academy of Sciences, 2021, no. 4, pp. 40–47. (in Russian). https://doi.org/10.37102/0869-7698_2021_218_04_03
 5. Peigné A., Bortolozzo U., Residori S., Molin S., Billault V., Nouchi P., Dolfi D., Huignard J. Adaptive interferometry for high-sensitivity optical fiber sensing. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, vol. 34, no. 19, pp. 4603–4609. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2552495>
 6. Kargin Yu.F., Burkov V.I., Marin A.A., Egorysheva A.V. *$\text{Bi}_{12}\text{Si}_x\text{O}_{20-8}$ Crystals with Sillenite Structure. Synthesis, Morphology, Properties*. Moscow, 2004, 312 p. (in Russian)
 7. Koc H., Palaz S., Simsek S., Mamedov A., Ozbay E. Elastic and optical properties of sillenites: First principle calculations. *Ferroelectrics*, 2020, vol. 557, no. 1, pp. 98–104. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1713354>
 8. Tolstik A.L., Hanon H.K. Dynamics of the photo-induced absorption in crystals of bismuth titanate. *Journal of the Belarusian State University. Physics, Mathematics, Informatics*, 2012, no. 2, pp. 3–7. (in Russian)
 9. Isik M., Delice S., Nasser H., Gasanly N.M., Darvishov N.H., Bagiev V.E. Optical characteristics of $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ single crystals by spectroscopic ellipsometry. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, vol. 120, pp. 105286. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105286>
 10. Kornienko T., Kisteneva M., Shandarov S., Tolstik A. Light-induced effects in sillenite crystals with shallow and deep traps. *Physics Procedia*, 2017, vol. 86, pp. 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.01.029>
 11. Tolstik A.L., Matusevich A.Yu., Kisteneva M.G., Shandarov S.M., Itkin S.I., Mandel' A.E., Kargin Yu.F., Kul'chin Yu.N., Romashko R.V. Spectral dependence of absorption photoinduced in a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystal by 532-nm laser pulses. *Quantum Electronics*, 2007, vol. 37, no. 11, pp. 1027–1032. <https://doi.org/10.1070/QE2007v037n11ABEH013371>
 12. Noh T.H., Hwang S.W., Kim J.U., Yu H.K., Seo H., Ahn B., Kim D.W., Cho I. Optical properties and visible light-induced photocatalytic activity of bismuth sillenites ($\text{Bi}_{12}\text{XO}_{20}$, X = Si, Ge, Ti). *Ceramics International*, 2017, vol. 43, no. 15, pp. 12102–12108. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.067>
 13. Shandarov S.M., Kisteneva M.G., Akrestina A.S., Vishnev A.S., Kargin Yu.F., Tolstik A.L. Change in absorption induced in a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$: Ca crystal by 870-nm infrared radiation. *High Energy Chemistry*, 2008, vol. 42, no. 7, pp. 554–556. <https://doi.org/10.1134/S0018143908070163>
 14. Matusevich A., Tolstik A., Kisteneva M., Shandarov S., Matusevich V., Kiessling A., Kowarschik R. Investigation of photo-induced absorption in a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystal. *Applied Physics B*, 2008, vol. 92, no. 2, pp. 219–224. <https://doi.org/10.1007/s00340-008-3098-z>
 15. Stankevich A.V., Tolstik A.L., Hanon H.K. Photoinduced absorption in bismuth titanate crystals on nano- and picosecond excitation. *Technical Physics Letters*, 2011, vol. 37, no. 8, pp. 746–749. <https://doi.org/10.1134/S1063785011080268>
 16. Dadenkov I.G., Tolstik A.L., Miksyuk Yu.I., Saechnikov K.A. Photoinduced absorption and pulsed recording of dynamic holograms in bismuth silicate crystals. *Optics and Spectroscopy*, 2020, vol. 128, no. 9, pp. 1401–1406. <https://doi.org/10.1134/S0030400X20090052>

Авторы

Даденков Иван Геннадьевич — младший научный сотрудник, Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Республика Беларусь, <https://orcid.org/0000-0003-0722-4683>, dadenkov.ivan@gmail.com

Толстик Алексей Леонидович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Республика Беларусь, <https://orcid.org/0000-0003-4953-4890>, tolstik@bsu.by

Миксюк Юрий Иванович — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, Минск, 220050, Республика Беларусь, <https://orcid.org/0000-0002-3969-0454>, miksiuk@mail.ru

Саечников Константин Алексеевич — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, Минск, 220050, Республика Беларусь, <https://orcid.org/0000-0001-8591-9312>, skabspu@tut.by

Authors

Ivan G. Dadenkov — Junior Researcher, Belarusian State University, Minsk, 220030, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0003-0722-4683>, dadenkov.ivan@gmail.com

Alexei L. Tolstik — D. Sc. (Physics & Mathematics), Head of Department, Belarusian State University, Minsk, 220030, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0003-4953-4890>, tolstik@bsu.by

Yuri I. Miksiuk — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Associate Professor, Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank, Minsk, 220050, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-3969-0454>, miksiuk@mail.ru

Konstantin A. Saechnikov — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Associate Professor, Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank, Minsk, 220050, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0001-8591-9312>, skabspu@tut.by