

УДК 535.343

UDC 535.343

## ЗАПИСЬ И СЧИТЫВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ В УСЛОВИЯХ ПРОЯВЛЕНИЯ ФОТОХРОМНОГО И ФОТОРЕФРАКТИВНОГО ЭФФЕКТОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ<sup>1</sup>

## RECORDING AND READING OF DIFFRACTION STRUCTURES IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS UNDER CONDITIONS OF PHOTOCROMIC AND PHOTOREFRACTIVE EFFECTS UNDER PULSED LASER EXCITATION

**И. Г. Даденков,**  
аспирант,

младший научный сотрудник  
кафедры лазерной физики  
и спектроскопии БГУ;

**А. Л. Толстик,**

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
НИУ «Институт прикладных физических  
проблем имени А. Н. Севченко» БГУ;

**Ю. И. Миксюк,**

кандидат физико-математических наук,  
доцент, директор УО «Республиканский  
институт контроля знаний»;

**К. А. Саечников,**

кандидат физико-математических  
наук, доцент, доцент кафедры физики  
и методики преподавания физики  
Белорусского государственного  
педагогического университета  
имени Максима Танка

**I. Dadenkov,**

Postgraduate Student,  
Assistant of the Department  
of Physical Culture and Sports,  
Polesye State University;

**A. Tolstik,**

PhD in Physics and Mathematics,  
Researcher of NRU «Institute  
of Applied Physical Problems named  
after A. Sevchenko», BSU;

**Yu. Miksyuk,**

PhD in Physics and Mathematics,  
Associate Professor of EE «Republican  
Institute of Control of Knowledge»;

**K. Sayechnikov,**

PhD in Physics and Mathematics,  
Associate Professor, Associate  
Professor of the Department  
of Physics and Methods of Teaching  
Physics, Belarusian State Pedagogical  
University named after Maxim Tank

Поступила в редакцию 15.09.2023.

Received on 15.09.2023.

Проведен анализ схем записи и считывания дифракционных структур в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов в условиях импульсного лазерного возбуждения. Определены актуальные длины волн для записи и считывания фоторефрактивных решеток. Проведены экспериментальные исследования динамики формирования и релаксации динамических решеток и фотохромного эффекта при лазерном возбуждении на разных длинах волн. Предложена феноменологическая модель записи динамических решеток в условиях проявления фотохромного и фоторефрактивного эффектов.

*Ключевые слова:* фоторефрактивные кристаллы, силикат висмута, динамические решетки, фоторефрактивная нелинейность, импульсная запись.

The analysis of the recording/reading scheme of diffraction structures in photorefractive crystals of the sillenite family under pulsed laser excitation is carried out. The actual wavelengths for recording and reading photorefractive gratings are determined. Experimental studies of the dynamics of the formation and relaxation of dynamic lattices and the photochromic effect under laser excitation at different wavelengths have been carried out. A phenomenological model of recording dynamic lattices under conditions of photochromic and photorefractive effects is proposed.

*Keywords:* photorefractive crystals, bismuth silicate, dynamic lattices, photorefractive nonlinearity, pulse recording.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (ГР 20211208).

**Введение.** Современные оптические исследования направлены на использование света в системах передачи, переработки, хранения и отображения информации. Преимущества использования в качестве фоточувствительных сред фоторефрактивных кристаллов подтверждаются возможностями 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 [1–5]. Высокая чувствительность фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов к записи оптической информации в видимой области спектра определяется уникальными фотохромными свойствами. Фотохромный эффект связан с переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости и последующим заселением ловушечных уровней в запрещенной зоне, наличие которых связано с дефектами кристаллической решетки и примесями. В связи с актуальностью тематики целый ряд работ посвящен исследованиям спектральных зависимостей фотоиндуцированного поглощения, наведенного в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов при использовании как непрерывного, так и импульсного лазерного излучения на разных длинах волн [6–9]. Особенность проявления фотохромного эффекта состоит в том, что при заселении ловушечных уровней в запрещенной зоне существенно увеличивается поглощение в длинноволновой области спектра. Несмотря на то что запись фоторефрактивных решеток основана на модуляции показателя преломления, связанного с эффектом Поккельса или Керра в пространственно-модулированном поле электрического заряда, фотохромный эффект может приводить к заметной модуляции коэффициента поглощения. В этом случае динамическую голограмму нужно считать амплитудно-фазовой.

Анализ вклада модуляции коэффициента поглощения при записи и считывании дифракционных структур в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов в условиях импульсного лазерного возбуждения и является целью исследований, представленных в данной работе.

**Экспериментальная установка и объекты исследований.** На основе спектральных характеристик экспериментальных об-

разцов (кристаллы силиката висмута) были определены актуальные длины волн для записи и считывания фоторефрактивных голограмм. Установлено, что предельная длина волны в сине-зеленой области спектра определяется толщиной используемого кристалла. При типичной толщине от 1 до 5 мм предельная длина волны менялась от 450 до 500 нм. С другой стороны, при смещении в красную область спектра коэффициент поглощения существенно уменьшался, что приводило к снижению чувствительности кристаллов для голографической записи и требовало увеличения интенсивности записывающего голограмму лазерного излучения. В то же время эта спектральная область являлась оптимальной для считывания голографических решеток.

Для экспериментальной реализации записи и считывания динамических голограмм в кристалле силиката висмута в условиях проявления фотохромного эффекта была разработана схема одновременного исследования динамики формирования и релаксации динамических решеток и динамики фотохромного эффекта. Схема установки, основанная на дифракционной решетке 8 и телескопической системе, состоящей из сферической линзы 10 и сферического зеркала 13, представлена на рисунке 1.

Достоинством схемы являлась возможность перестройки длины волны записывающего голограмму излучения с сохранением периода решетки, что не требовало переюстировки направления распространения излучения считывающего лазера 11. Для записи голографических решеток с периодом 2,5 мкм в кристалле силиката висмута 12 использовалось излучение параметрического генератора 4 с длительностью импульсов 20 нс. В схеме также реализована функция одновременного измерения динамики дифракционной эффективности и фотоиндуцированного поглощения. Для анализа кинетик фотоиндуцированного поглощения и динамических решеток на засвечиваемую область кристалла 12 с помощью зеркала 14 направлялось зондирующее излучение гелий-неонового лазера 11 мощностью 2 мВт. Проходящее через кристалл излучение и дифрагированный луч направлялись на скоростные фотоприемные устройства 17 и 18 на основе р-і-п фотодиодов соответственно, подключенные к осциллографу.

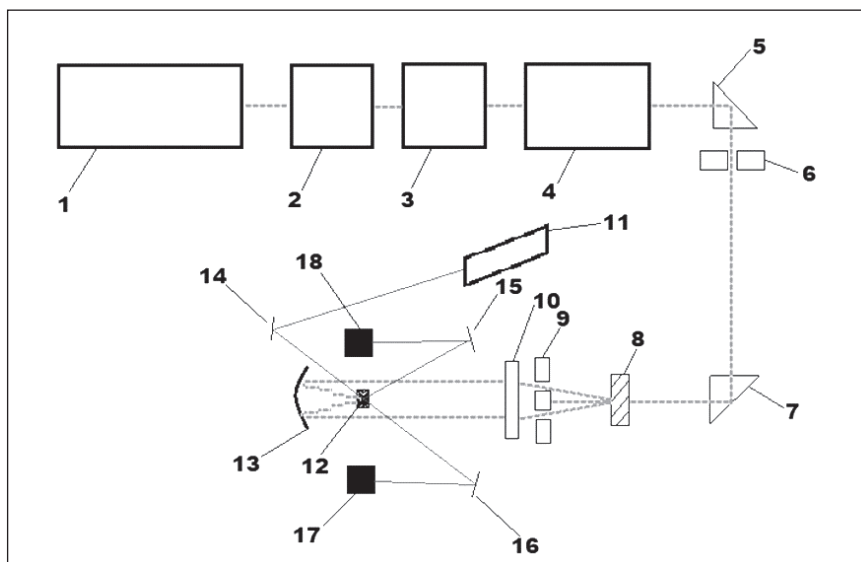


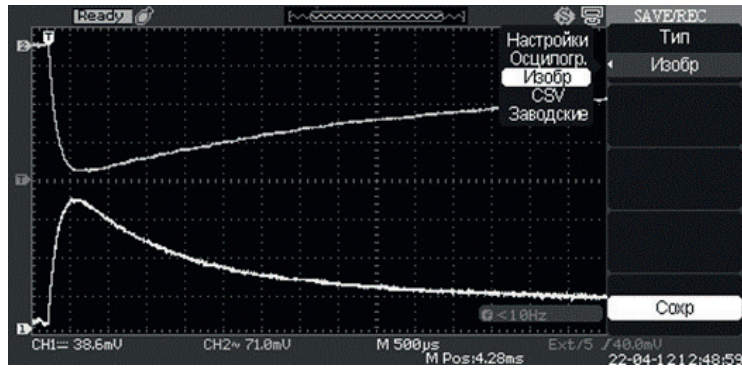
Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для одновременного исследования динамики формирования и релаксации динамических решеток и динамики фотохромного эффекта в кристаллах силиката висмута: 1 – импульсный Nd:YAG лазер; 2 – генератор 2-й гармоники на кристалле KTP; 3 – генератор 3-й гармоники на кристалле LBO; 4 – параметрический генератор с диапазоном перестройки от 400 нм до 2 мкм; 5, 7 – призма; 6, 9 – диафрагма; 8 – дифракционная решетка; 10 – линза; 11 – непрерывный гелий-неоновый лазер; 12 – фоторефрактивный кристалл; 13 – сферическое зеркало; 14–16 – зеркала; 17, 18 – скоростные фотоприемные устройства

**Результаты и их обсуждение.** Благодаря использованию параметрического генератора для исследования динамики формирования и релаксации динамических решеток и динамики фотохромного эффекта была возможность использования когерентного излучения на разных длинах волн. Учитывая разное поглощение излучения на разных длинах волн, энергии импульсов подбирались таким образом, чтобы обеспечить фиксированную поглощенную в кристалле энергию. С учетом спектра поглощения и рабочего спектрального диапазона эта величина составила 50 мкДж.

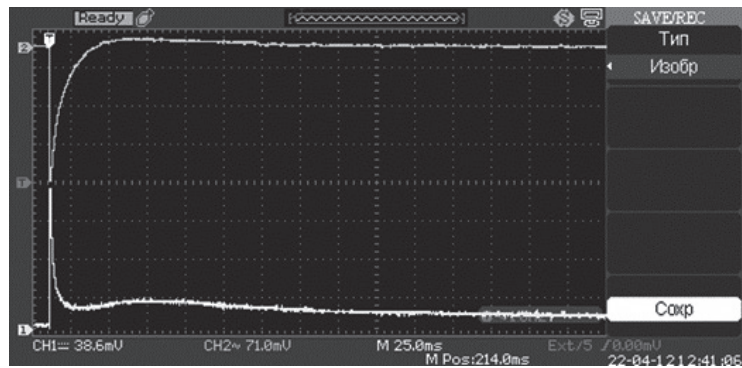
Характерные осциллограммы прошедшего через кристалл и дифрагированного излучений представлены на рисунке 2.

Для прошедшего луча (верхние кривые), характеризующего наблюдение за кинетикой фотоиндуцированного поглощения, характерен резкий спад, отвечающий за увеличение коэффициента поглощения. В условиях эксперимента фотохромный эффект, проявляющийся в увеличении поглощения, связан с переходом электронов в зону проводимости и заселением мелких ловушек, что приводит к уменьшению интенсивности зондирующего пучка. Затем за времена порядка 30–50 мс происходят процессы релаксации. Заметим, что на длине волны 465 нм имеет

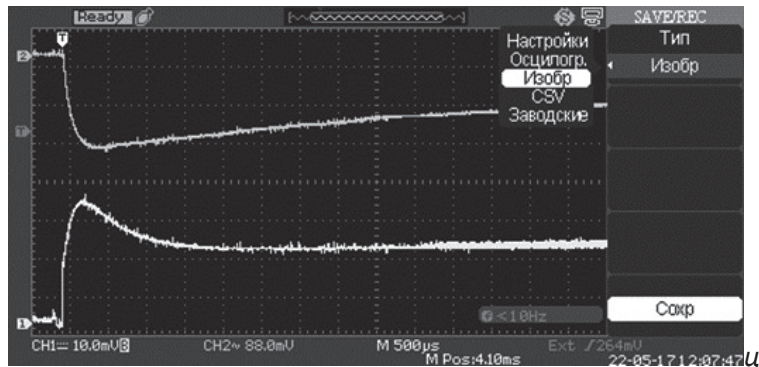
место небольшое просветление в диапазоне 50–75 мс. Нижние кривые на рисунках показывают, что фотохромный процесс обеспечивает условия формирования динамических решеток. Кинетика динамической решетки имеет два максимума с существенно различающимися временами. На первом этапе за время порядка сотни микросекунд формируется решетка с временем релаксации на уровне нескольких миллисекунд. Через несколько десятков миллисекунд формируется вторая решетка с временем релаксации в сотни миллисекунд. При сравнении рисунков (а) и (с) можно сделать вывод о том, что времена, необходимые для достижения максимума дифракционной эффективности короткоживущей решетки (нижняя кривая) и максимума фотоиндуцированного затемнения (верхняя кривая), оказываются очень близки. При сравнении вида кинетик дифракционных эффективностей на рисунках (b) и (d) заметно ярко выраженное ослабление короткоживущей решетки при изменении длины волны записывающего излучения, однако положения локальных максимумов остаются на тех же временных промежутках. Похожая ситуация наблюдается и для локальных максимумов дифракционной эффективности в диапазоне от 50 до 75 мс.



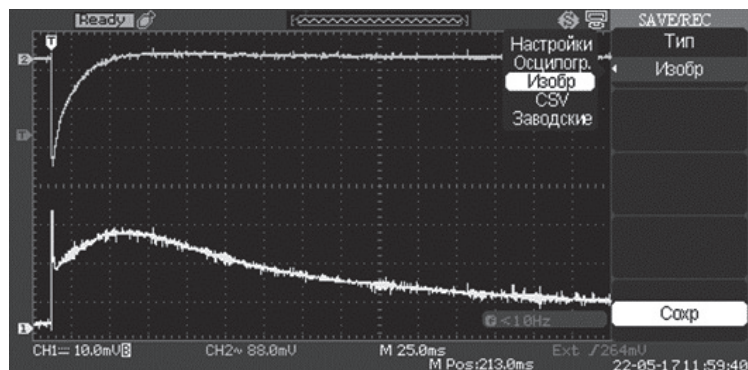
a



b



c



d

Рисунок 2 – Осциллограммы кинетики фотохромного эффекта (сверху) и динамических решеток (снизу) для длин волн 465 и 525 нм с временным масштабом 500 мкс (а, с) и 25 мс (b, d) соответственно, записанные при фиксированной поглощенной энергии 50 мкДж



Для объяснения полученных результатов была предложена феноменологическая модель дифракции на амплитудно-фазовых пропускающих решетках. Дифракционная эффективность объемной фазовой решетки можно рассчитать по известной формуле:

$$\eta = \sin^2 \left( \frac{\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda} \right), \quad (1)$$

где  $d$  – толщина кристалла,  $\lambda$  – длина волны падающего излучения,  $\Delta n$  – глубина модуляции показателя преломления.

Период пропускающих решеток определяется формулой

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta / 2)}, \quad (2)$$

где  $\theta$  – угол между световыми пучками, записывающими голограмму.

Учитывая, что для кристаллов семейства силленитов фоторефрактивный эффект определяется эффектом Поккельса и электрооптическими коэффициентами  $\gamma$ , изменение показателя преломления среды можно найти, используя выражение:

$$\Delta n = \frac{n^3}{2} r E_{sc}, \quad (3)$$

где  $n$  – показатель преломления неосвещенного кристалла;  $r$  – электрооптический коэффициент.

Величина поля пространственного заряда при диффузионном механизме записи решеток в фоторефрактивных кристаллах определяется формулой:

$$E_{sc} = \frac{k_B T}{e} \cdot \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (4)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $e$  – заряд электрона.

Используя формулы (2)–(4), можно рассчитать нелинейное изменение показателя преломления, а по формуле (1) рассчитывается дифракционная эффективность фазовой динамической решетки. При типичных значениях изменения показателя преломления  $\Delta n \sim 10^{-4} - 10^{-5}$  и толщине кристалла 1–2 мм имеем значения дифракционной эффективности на уровне единиц и десятков процентов. Как видно из уравнения (1), мак-

симальное значение дифракционной эффективности 100 % достигается при

$$\Delta n d = \lambda / 2. \quad (5)$$

Ситуация существенно меняется для амплитудной объемной голограммы, дифракционная эффективность которой определяется глубиной модуляции коэффициента поглощения  $\Delta k$ . Для нахождения дифракционной эффективности в этом случае можно воспользоваться формулой (1), учитывая переход от обычного показателя преломления  $n$  к комплексному:

$$\hat{n}(\omega) = n(\omega) + ik(\omega), \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент экстинкции, связанный с коэффициентом поглощения формулой:

$$k(\omega) = ck(\omega) / 2\omega. \quad (7)$$

Подставив мнимую часть выражения (6) в формулу (1) имеем:

$$\eta = sh^2(\Delta kd / 2). \quad (8)$$

Следует заметить, что использование понятия комплексного показателя преломления позволило найти дифракционную эффективность, обусловленную модуляцией коэффициента поглощения, но не учло поглощение волн при их распространении в фоточувствительной среде. Учет поглощения сигнальной и опорной волн, записывающих динамическую решетку, в соответствии с законом Бугера – Ламберта – Бера приводит к появлению дополнительного экспоненциального множителя:

$$\eta = \exp(-2kd) sh^2(\Delta kd / 2). \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет рассчитать дифракционную эффективность объемной амплитудной решетки, зная толщину поглощающего слоя  $d$ , коэффициент поглощения  $k$  и модуляцию коэффициента поглощения  $\Delta k$ . Учитывая, что величина  $\Delta k$ , как правило, заметно меньше  $k$ , из выражения (9) следует, что максимальная дифракционная эффективность амплитудной решетки находится на уровне нескольких процентов. Следовательно, максимальная дифракционная эффективность амплитудных пропускающих решеток, записываемых в фоторефрактивных кристаллах, в десятки раз меньше максимальной дифракционной эффективности фазовых решеток.

Анализ экспериментальных результатов, представленных на рисунке 2, показывает, что несмотря на то, что времена, необходимые для достижения максимума дифракционной эффективности короткоживущей решетки (нижние кривые) и максимума фотоиндуцированного затемнения (верхние кривые), оказываются близки, вклад амплитудной решетки несущественен. Увеличение поглощения связано с переходом электронов в зону проводимости и заселением ловушечных уровней, но при этом также изменяется показатель преломления. Изменение показателя преломления может быть связано как с локальным механизмом заселения ловушечных уровней, так и за счет диффузии электронов, генерации внутреннего электрического поля и модуляции показателя преломления вследствие эффекта Поккельса. Сравнение кинетик дифракционной эффективности и наведенного поглощения указы-

вает на отсутствие однозначных корреляций верхних и нижних кривых на рисунках. Как видно, времена релаксации наведенного поглощения (~30 мс) существенно превышают времена релаксации короткоживущих динамических решеток (несколько миллисекунд) и существенно меньше времени релаксации долгоживущих решеток (сотни миллисекунд).

**Заключение.** Таким образом, можно говорить о формировании в фоторефрактивном кристалле силиката висмута коротко- и долгоживущих динамических решеток, при этом времена релаксации наведенного поглощения (фотохромный эффект) существенно превышают времена релаксации короткоживущих динамических решеток, формируемых в фоторефрактивных кристаллах силиката висмута, и существенно меньше времени релаксации долгоживущих решеток.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. – СПб. : Наука, 1992. – 317 с.
2. Шепелевич, В. В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах / В. В. Шепелевич. – Мозырь: УО МГПУ им. И. П. Шамякина, 2012. – 287 с.
3. Динамические голограммы Денисюка в кубических фоторефрактивных кристаллах / С. М. Шандаров [и др.] // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38 – № 11. – С. 1059–1069.
4. Ромашко, Р. В. Адаптивная голографическая интерферометрия: техника, прогресс и приложения / Р. В. Ромашко // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2021. – № 4. – С. 40–47.
5. Adaptive Interferometry for High-Sensitivity Optical Fiber Sensing / A. Peigne [et al.] // J. Lightwave Technol. – 2016. – № 34. – P. 4603–4609.
6. Optical properties and visible light-induced photocatalytic activity of bismuth sillenites ( $\text{Bi}_{12}\text{XO}_{20}$ , X = Si, Ge, Ti) / T. H. Noh [et al.] // Ceramics International. – 2017. – № 43. – P. 12102–12108.
7. Станкевич, А. В. Фотоиндуцированное поглощение в кристаллах титаната висмута при нано- и пикосекундном возбуждении / А. В. Станкевич, А. Л. Толстик, Х. К. Хайдер // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – №16. – С. 7–14.
8. Фотоиндуцированное поглощение и импульсная запись динамических голограмм в кристаллах силиката висмута / И. Г. Даденков [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128. – № 9. – С. 1290–1295.
9. Спектральные зависимости оптического поглощения, наведенного в кристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$  импульсным лазерным излучением с длиной волны 532 нм / В. Г. Дю, [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – Т. 26. – № 2. – Ч. 2. – С. 86–89.

#### REFERENCES

1. Petrov, M. P. Fotorefraktivnye kristally v kogerentnoj optike / M. P. Petrov, S. I. Stepanov, A. V. Homenko. – SPb. : Nauka, 1992. – 317 s.
2. Shepelevich, V. V. Golografiya v fotorefraktivnyh opticheski aktivnyh kristallah / V. V. Shepelevich. – Mozyr': UO MGPU im. I. P. Shamyakina, 2012. – 287 s.
3. Dinamicheskie gologrammy Denisyuka v kubicheskikh fotorefraktivnyh kristallah / S. M. Shandarov [i dr.] // Kvantovaya elektronika. – 2008. – T. 38 – № 11. – S. 1059–1069.
4. Romashko, R. V. Adaptivnaya golograficheskaya interferometriya: tekhnika, progress i prilozheniya / R. V. Romashko // Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. – 2021. – № 4. – S. 40–47.
5. Adaptive Interferometry for High-Sensitivity Optical Fiber Sensing / A. Peigne [et al.] // J. Lightwave Technol. – 2016. – № 34. – P. 4603–4609.
6. Optical properties and visible light-induced photocatalytic activity of bismuth sillenites ( $\text{Bi}_{12}\text{XO}_{20}$ , X = Si, Ge, Ti) / T. H. Noh [et al.] // Ceramics International. – 2017. – № 43. – P. 12102–12108.
7. Stankevich, A. V. Fotoinducirovannoe pogloshchenie v kristallah titanata vismута pri nano- i pikosekundnom vzbuzhdenii / A. V. Stankevich, A. L. Tolstik, H. K. Hajder // Pis'ma v ZhTF. – 2011. – T. 37. – №16. – S. 7–14.
8. Fotoinducirovannoe pogloshchenie i impul'snaya zapis' dinamicheskikh gologramm v kristallah silikata vismута / I. G. Dadenkov [i dr.] // Optika i spektroskopiya. – 2020. – T. 128. – № 9. – S. 1290–1295.
9. Spektral'nye zavisimosti opticheskogo pogloshcheniya, navedennogo v kristallah  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  i  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$  impul'snym lazernym izlucheniem s dlinoj volny 532 nm / V. G. Dyu, [i dr.] // Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki. – 2012. – T. 26. – № 2. – Ch. 2. – S. 86–89.