

УДК 535.343

UDC 535.343

МУЛЬТИПЛЕКСНАЯ ЗАПИСЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ СИЛИКАТА ВИСМУТА

MULTIPLEX RECORD OF DYNAMIC HOLOGRAMS IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS OF BISMUTH SILICATE

И. Г. Даденков,
*стажер младшего научного
сотрудника кафедры лазерной
физики и спектроскопии БГУ;*

I. Dadenkov,
*Trainee of Junior Researcher
of the Department of Laser
Physics and Spectroscopy, BSU;*

А. Л. Толстик,
*кандидат физико-математических
наук, старший научный сотрудник
кафедры теоретической
физики и астрофизики БГУ;*

A. Tolstik,
*PhD in Physics and Mathematics,
Senior Researcher of the Department
of Theoretical Physics
and Astrophysics, BSU;*

Ю. И. Миксюк,
*кандидат физико-математических
наук, доцент, директор УО «Республи-
канский институт контроля знаний»;*

Yu. Miksyuk,
*PhD in Physics and Mathematics,
Associate Professor, Director of SE
“Republican Institute of Control of Knowledge”;*

К. А. Саечников,
*кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент кафедры физики
и методики преподавания физики
Белорусского государственного
педагогического университета
имени Максима Танка*

K. Saechnikov,
*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 29.05.20.

Received on 29.05.20.

Исследованы схемы одновременной записи нескольких голограмм в фоторефрактивном кристалле силиката висмута, на основе которых реализована мультиплексная запись динамических голограмм мощными лазерными импульсами длительностью 20 нс. Определены условия записи решеток с временами жизни, отличающимися на три порядка. Показаны существенные зависимости времени жизни решетки и дифракционной эффективности в условиях мультиплексной записи от интенсивности падающего излучения. Выявлен эффект конкуренции мультиплексных решеток, записываемых на одном участке кристалла с разными периодами.

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

The article studies the schemes of simultaneous recording of several holograms in photorefractive crystal of bismuth silicate on the base of which the multiplex record of dynamic holograms by strong laser impulses as long as 20 ns is realized. It defines the conditions of recording the lattices with the periods of life differing by three degrees. It shows the significant dependence of life of lattice and diffraction effectiveness in the conditions of multiplex recording from the intensity of the radiation. It reveals the effect of competition of multiplex lattices recorded on the same area of the crystal with different periods.

Keywords: photorefractive crystals, bismuth silicate, dynamic lattices, multiplex holography, photorefractive nonlinearity, impulse record.

Введение. Интерес к мультиплексной записи динамических голограмм обусловлен их использованием в голографических системах хранения и обработки информации, системах

ассоциативной памяти, голографических корреляторах изображений, голографической интерферометрии и т. д. Применение интерферометрических принципов в построении

оптических измерительных систем позволяет фиксировать изменения расстояний, сопоставимые с длиной световой волны, и является одним из немногих известных способов неразрушающего исследования материалов [1].

При построении голографических интерферометров весьма эффективным оказалось использование фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов, которые работают в видимом диапазоне спектра и отличаются высокой чувствительностью [2, 3]. При создании многомерных измерительных систем, состоящих из большого числа датчиков и измерительных каналов, возникает необходимость в использовании соответствующего количества кристаллов и опорных световых пучков, что приводит к нежелательному усложнению измерительной системы. Одним из возможных решений данной проблемы является мультиплексирование, то есть запись нескольких голограмм в одном и том же кристалле [4]. Мультиплексирование голограмм в кристалле возможно двумя способами. В первом из них разделение информационных каналов осуществляется за счет создания условий, при которых голограммы оказываются по-разному ориентированы в кристалле. В основу второго способа положен метод спектрального мультиплексирования голограмм, в рамках которого голограммы записываются на разных, но близко расположенных длинах волн.

Целью работы являлось исследование закономерностей мультиплексной записи динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов при импульсном лазерном возбуждении.

Экспериментальная установка и объекты исследований. При расчете параметров предполагаемой экспериментальной установки полагалось, что голограммы записывались с помощью лазерного излучения с длиной волны λ_1 , при этом угол записи (угол между направлениями распространения опорной и сигнальной электромагнитными волнами) был равен θ_1 . При нахождении угла считывания θ_2 (угол между направлениями распространения считывающей и дифрагированной электромагнитных волн), в случае если длина волны считывающего излучения равна λ_2 , зависимость угла считывания от угла между записывающими голограмму световыми пучками может быть представлена в следующем виде:

$$\theta_2 = 2 \arcsin \left(\frac{k_1}{k_2} \sin \frac{\theta_1}{2} \right) = 2 \arcsin \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sin \frac{\theta_1}{2} \right),$$

где k_1 и k_2 – волновые векторы соответственно опорной и считывающей электромагнитных волн.

На рисунке 1 приведены результаты расчетов углов считывания, соответствующих углам записи в диапазоне от 10 до 110 градусов. Эти данные получены в предположении использования для записи голограммы лазера на итрий-алюминиевом гранате с длиной волны излучения $\lambda_1 = 532$ нм, а для считывания гелий-неонового лазера с длиной волны излучения $\lambda_2 = 632,8$ нм. Из графика видно, что угол считывания значительно превышает угол записи во всем диапазоне изменения углов и изменяется в пределах от 11,9 до 155 градусов.

Для определения соответствующих углов считывания важное значение имеет величина угловой селективности записанной голограммы. Рассматривалась объемная фазовая пропускающая голограмма в фоторефрактивном кристалле силиката висмута $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO), где для записи решетки и ее считывания применялись те же лазеры с теми же длинами волн (532 нм и 632,8 нм). Чтобы вычислить угловую селективность, сначала находили период голографической решетки [5]:

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

где θ – угол между опорным и сигнальным пучками на входе в кристалл.

Кроме того, необходимо было определить угол Брэгга внутри кристалла:

$$\theta_B = \arcsin \frac{\lambda_R}{2n\Lambda},$$

где n – показатель преломления кристалла BSO, который для длины волны считывания составляет величину 2,6.

Далее находилось поле пространственного заряда, которое в случае диффузионного механизма записи решеток в фоторефрактивном кристалле определялось следующей формулой:

$$E_{sc} = \frac{2\pi k_B T}{1 + \left(\frac{\Lambda_0}{\Lambda} \right)^2},$$

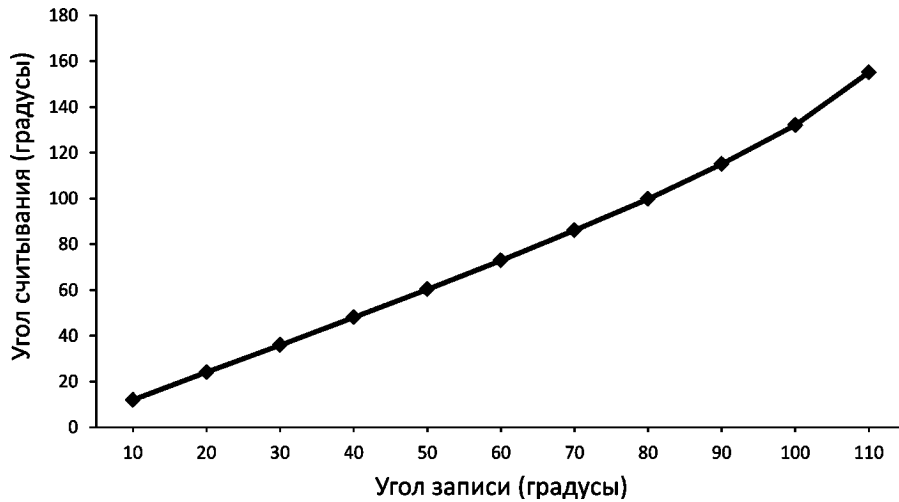


Рисунок 1 – График зависимости углов считывания от углов записи голограмм

где $\Lambda_0 = \frac{2\pi}{e} \sqrt{\frac{k_B \varepsilon T}{N}}$ – оптимальное значение периода решетки, при котором величина поля достигает максимального значения, где k_B – постоянная Больцмана; T – температура; e – элементарный электрический заряд, ε – диэлектрическая проницаемость, N – концентрация компенсирующих акцепторных центров.

Амплитуда вызванного фоторефрактивным эффектом изменения коэффициента преломления описывается выражением:

$$\Delta n = \frac{n^3}{2} rE,$$

где r – электрооптический коэффициент кристалла. Для кристалла BSO он равен $5 \cdot 10^{-12}$ м/В.

Рассматривалась симметричная схема записи голограммы, при которой положение

штрихов решетки располагалось перпендикулярно к поверхности материала. Для нахождения угловой селективности находилась зависимость дифракционной эффективности от изменения угла падения $\Delta\theta$ светового пучка. Данная зависимость при записи голограммы по симметричной схеме задается формулой [8]:

$$\eta = \frac{\sin^2 \sqrt{v^2 + \xi^2}}{1 + \frac{\xi^2}{v^2}},$$

где параметры: $v = \frac{\pi d \Delta n}{\lambda_R \cos \theta_B}$, $\xi = \frac{\Delta \theta \pi d}{\Lambda}$, d – толщина кристалла.

Угловая селективность определяется как ширина контура зависимости дифракционной эффективности от изменения угла падения восстанавливающего излучения на полувысоте. На рисунке 2 представлены результаты расчетов угловой селективности объемной

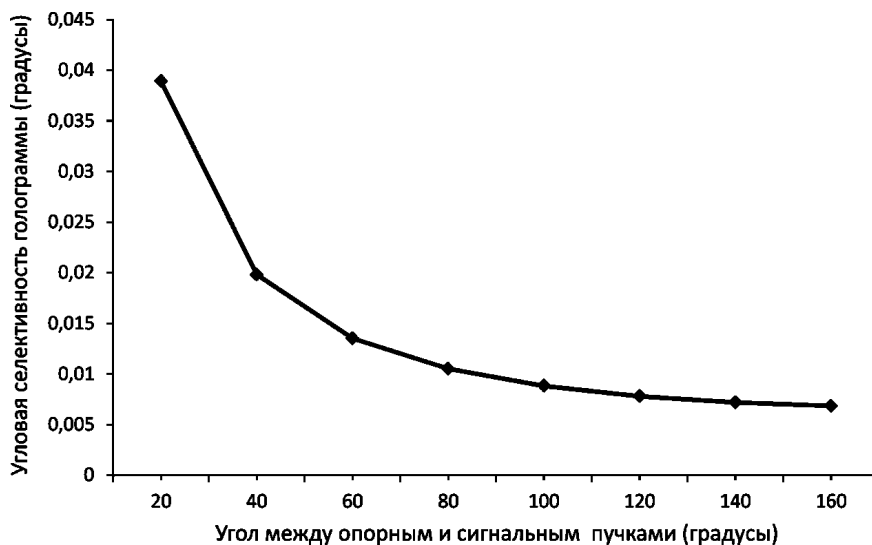


Рисунок 2 – Зависимость угловой селективности голограммы от угла между опорным и сигнальным световыми пучками (кристалл BSO толщиной 2 миллиметра)

фазовой пропускающей голограммы для различных углов между опорным и сигнальным пучками.

Из рисунка 2 видно, что чем больше угол между направлениями распространения световых пучков, записывающих решетку, тем уже диапазон углов восстанавливающего света. При этом величина угловой селективности голограммы находится в пределах от $3,9 \cdot 10^{-2}$ до $6,8 \cdot 10^{-3}$ градусов при изменении угла между записывающими пучками от 20 до 160 градусов.

Для исследования процессов записи и релаксации мультиплексных динамических решеток была собрана экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 3. Для записи голограмм использовался импульсный лазер 1 на иттрий-алюминиевом гранате с длиной волны излучения $\lambda = 532$ нм и длительностью импульса 20 нс. Глухие зеркала 3 и оптические клинья 4 формировали опорную «О» и две сигнальные волны «С» и «С'». Использование стеклянных клиньев решает проблему перекрытия двух пучков, отраженных от границ плоскопараллельной пластинки так, как отраженный луч от внутренней границы клина не будет попадать в область

ми, записывающими голограммы. Так, угол между пучками «О» и «С» составил 53° , угол между пучками «О» и «С'» составил 66° . Следовательно, динамические решетки имели периоды порядка длины волны: 596 и 488 нм соответственно. Интенсивности лучей, формирующих решетки, соотносятся как 2 : 1 : 2 для волн «О» : «С» : «С'», то есть одна сигнальная волна имела такую же интенсивность, как и опорная, а вторая была в два раза слабее. Мультиплексная запись происходила в области фоторефрактивного кристалла 6, освещаемого световыми пучками, площадь сечения которых составляла 12 мм^2 .

Следует отметить, что предложенная схема мультиплексной записи голограмм позволяет решить классическую проблему согласования оптических длин хода лучей опорной и сигнальных волн («О», «С», «С'») за счет смещения зеркал 3.

Для считывания динамических решеток использовалось излучение He-Ne лазера 2 ($\lambda = 632,8$ нм), которое с помощью полупрозрачного зеркала 5 и глухого зеркала 3 направлялось на фоторефрактивный кристалл под углом Брегга, обеспечивая условия считывания двух динамических решеток.

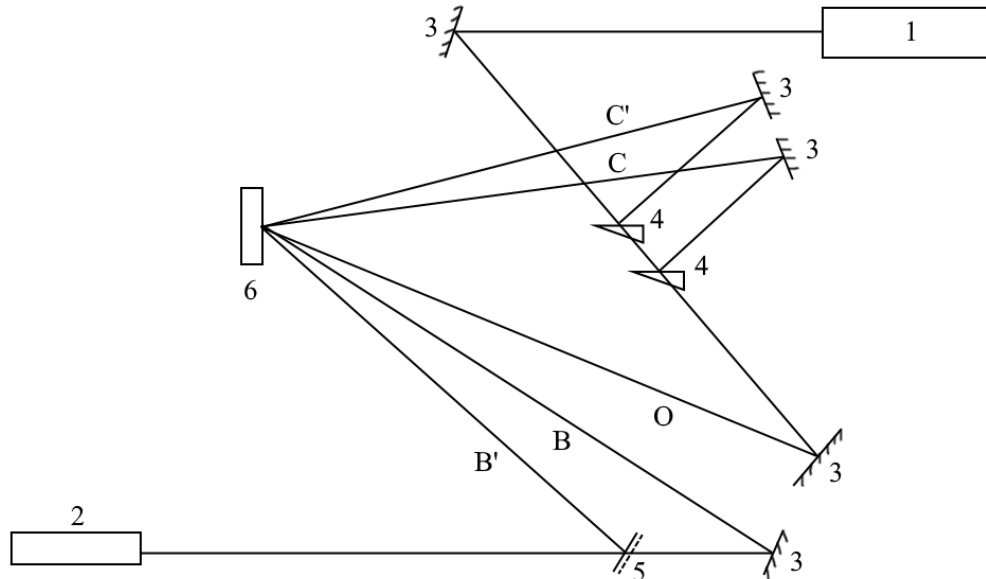


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки для мультиплексной записи динамических решеток (1 – импульсный лазер, 2 – непрерывный лазер, 3 – зеркало, 4 – стеклянный клин, 5 – полупрозрачное зеркало, 6 – фоторефрактивный кристалл; С и С' – сигнальные волны, О – опорная волна, В и В' – восстанавливающие волны)

формирования голограммы. Для обеспечения условий мультиплексной записи в соответствии с данными, представленными на рисунках 1 и 2, и исходя из удобства расстановки механических узлов и оптических элементов были выбраны углы между световыми пучка-

Регистрация дифрагированных пучков проводилась с использованием скоростных фотодиодных приемников и двухканального цифрового осциллографа.

Объектами исследования являлись дифракционные динамические решетки, запи-

санные в фоторефрактивных кристаллах сикликата висмута.

Результаты и их обсуждение. Исследование зависимости динамики формирования и релаксации динамических решеток от интенсивности записывающего голограмму излучения происходило в диапазоне от 0,5 до 25 МВт/см². На рисунке 4 представлены осциллограммы, описывающие динамику дифрагированного излучения гелий-неонового лазера на двух решетках, записанных волнами «О», «С» (CH2) и «О», «С'» (CH1).

Как видно из приведенных рисунков, имеет место существенная зависимость времени жизни решетки от интенсивности падающего излучения. Так, в диапазоне до 10 МВт/см² время жизни решетки составляет порядка 1 с. При дальнейшем увеличении интенсивности появляется быстрая компонента с временем жизни на три порядка меньше (на уровне 1 мс), причем с увеличением интенсивности вклад медленной компоненты уменьшается, а быстрой – увеличивается.

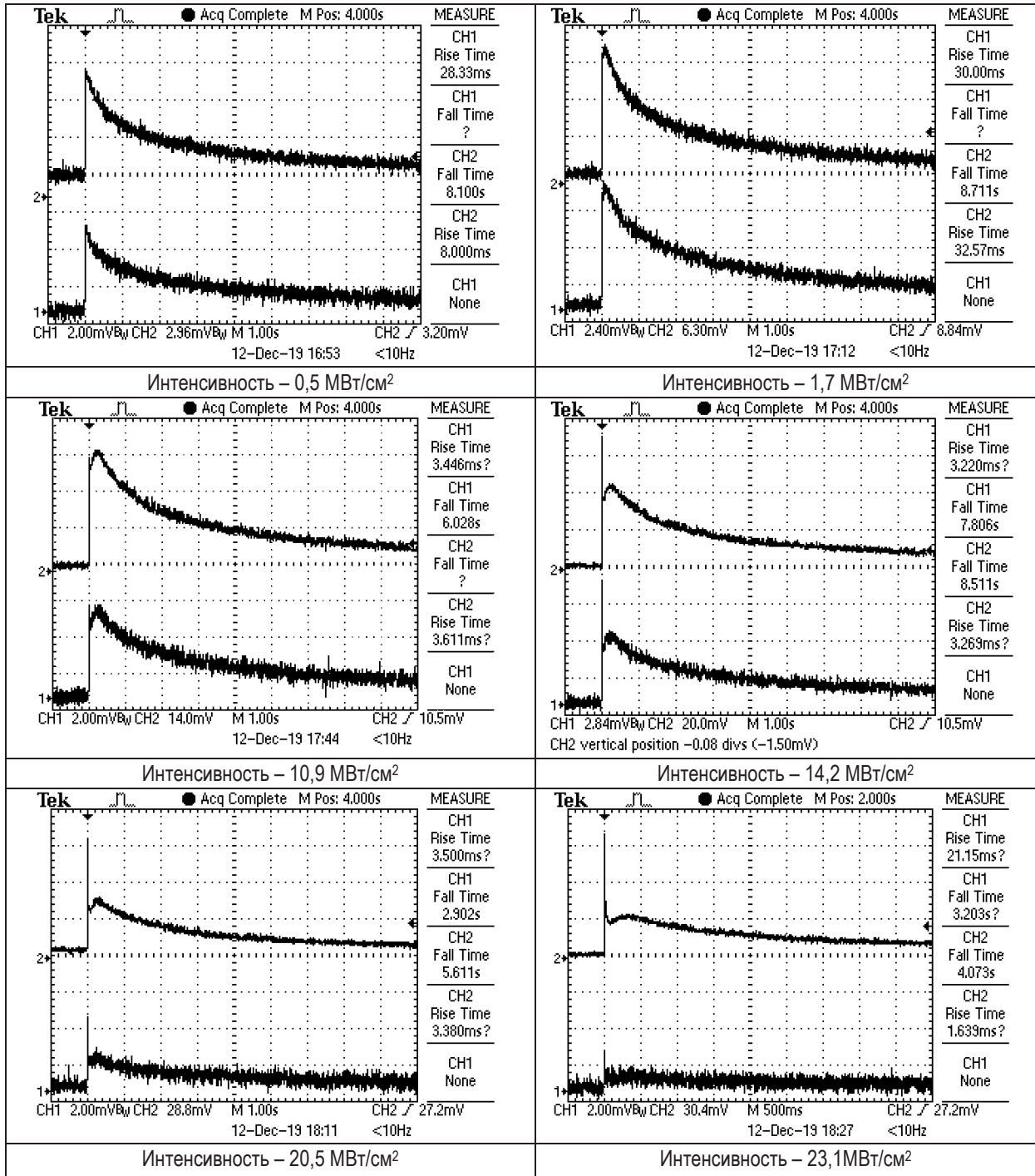


Рисунок 4 – Осциллограммы дифрагированных сигналов на двух решетках, записанных волнами «О», «С» (CH2) и «О», «С'» (CH1) при различных значениях интенсивности

Следует обратить внимание, что с увеличением интенсивности записывающих динамические решетки волн меняется соотношение между интенсивностями излучения, дифрагированного на решетках с разными периодами. При мультиплексной записи решеток высокоинтенсивным излучением имеет место конкуренция между голограммами, что выражается в некотором затирании решетки с меньшим периодом. Так, если при небольших интенсивностях дифрагированные сигналы на обеих решетках близки по величине, то с ростом интенсивности дифрагированный сигнал на решетке, имеющей меньший период, уменьшается и при интенсивности больше 20 МВт/см² такая решетка практически не записывается. Более того,

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашко, Р. В. Адаптивные волоконно-оптические измерительные системы / Р. В. Ромашко, Ю. Н. Кульчин // Вестник ДВО РАН – 2006. – № 4. – С. 94–99.
2. Островский, Ю. И. Голографическая интерферометрия / Ю. И. Островский, М. М. Бутусов, Г. В. Островская. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
3. Ромашко, Р. В. Физические основы построения сверхвысокочувствительных адаптивных измерительных систем на основе динамических голограмм: дис. ... д-ра. физ.-мат. наук: 01.04.21. – Владивосток, 2010. – 309 с.
4. Multiplexed holograms in phenanthrenequinone-polymethylmethacrylate composite for microscopic applications / A. Trofimova [et. al.] // Optical materials express – 2017. – V. 7. – № 5. – P. 1446–1452.
5. Петров, М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. – СПб. : Наука, 1992. – 320 с.
6. 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.
7. Импульсная голографическая запись коротко- и долгоживущих динамических решеток в кристаллах силиката и титаната висмута / И. Н. Агишев [и др.] // VI Конгресс физиков Беларуси (Минск, 20–23 ноября 2017г.) : сборник научных трудов. – Минск : Институт физики НАН Беларуси. – 2017. – С. 190–191.
8. Kogelnik, H. Coupled wave theory for thick hologram gratings / H. Kogelnik // The Bell system technical journal. – 1969. – V. 48. – N 9. – P. 2909–2947.

два механизма записи динамических решеток с временами жизни, отличающимися на три порядка, связаны с заселением в запрещенной зоне примесного кристалла силиката висмута коротко- и долгоживущих ловушечных уровней [6, 7].

Заключение. Таким образом, в работе определены условия мультиплексной записи динамических решеток в фоторефрактивном кристалле силиката висмута при использовании лазерных импульсов наносекундной длительности. Установлена возможность записи как коротко- (миллисекунды), так и долгоживущих (секунды) голографических решеток и выявлен эффект конкуренции мультиплексных решеток, записываемых на одном участке кристалла с разными периодами.

REFERENCES

1. Romashko, R. V. Adaptivnye volokonno-opticheskie izmeritel'nye sistemy / R. V. Romashko, Yu. N. Kul'chin // Vestnik DVO RAN – 2006. – № 4. – S. 94–99.
2. Ostrovskij, Yu. I. Golograficheskaya interferometriya / Yu. I. Ostrovskij, M. M. Butusov, G. V. Ostrovskaya. – M. : Nauka, 1977. – 336 s.
3. Romashko, R. V. Fizicheskie osnovy postroeniya sverhvysokochuvstvitel'nyh adaptivnyh izmeritel'nyh sistem na osnove dinamicheskikh gologramm: dis. ... d-ra. fiz.-mat. nauk: 01.04.21. – Vladivostok, 2010. – 309 s.
4. Multiplexed holograms in phenanthrenequinone-polymethylmethacrylate composite for microscopic applications / A. Trofimova [et. al.] // Optical materials express – 2017. – V. 7. – № 5. – P. 1446–1452.
5. Petrov, M. P. Fotorefraktivnye kristally v kogerentnoj optike / M. P. Petrov, S. I. Stepanov, A. V. Homenko. – SPb. : Nauka, 1992. – 320 s.
6. Stankevich, A. V. Fotoinducirovanoe pogloshchenie v kristallah titanata vismuta pri nano- i pikosekundnom возбуждении / A. V. Stankevich, A. L. Tolstik, H. K. Hajder // Pis'ma v ZhTF – 2011. – T. 37. – № 16. – S. 7–14.
7. Impul'snaya golograficheskaya zapis' korotko- i dolgozhivushchih dinamicheskikh reshetok v kristallah silikata i titanata vismuta / I. N. Agishev [i dr.] // VI Kongress fizikov Belarusi (Minsk, 20–23 noyabrya 2017g.) : sbornik nauchnyh trudov. – Minsk : Institut fiziki NAN Belarusi. – 2017. – S. 190–191.
8. Kogelnik, H. Coupled wave theory for thick hologram gratings / H. Kogelnik // The Bell system technical journal. – 1969. – V. 48. – N 9. – P. 2909–2947.