

УДК 535.343

UDC 535.343

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОПУСКАЮЩИХ И ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ В СХЕМЕ МУЛЬТИПЛЕКСНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЗАПИСИ В КРИСТАЛЛАХ СЕМЕЙСТВА СИЛЛЕНИТОВ¹

OPTIMIZATION OF CONDITIONS FOR THE FORMATION OF TRANSMISSION AND REFLECTION HOLOGRAMS IN A MULTIPLEX PULSE RECORDING SCHEME IN CRYSTALS OF THE SILLENITE FAMILY

И. Г. Даденков,
аспирант, младший научный сотрудник
кафедры лазерной физики
и спектроскопии БГУ
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0722-4683>;

А. Л. Толстик,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
НИУ «Институт прикладных физических
проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4660-0444>;

Ю. И. Миксюк,
кандидат физико-математических
наук, доцент,
директор УО «Республиканский
институт контроля знаний»,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3969-0454>;

К. А. Саечников,
кандидат физико-математических
наук, доцент,
доцент кафедры физики и методики
преподавания физики Белорусского
государственного педагогического
университета имени Максима Танка
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5744-1244>

I. Dadenkov,
graduate student, junior researcher
Department of Laser Physics
and Spectroscopy of BSU
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0722-4683>;

A. Tolstik,
PhD in Physics and Mathematics,
Researcher of NRU «Institute
of Applied Physical Problems named
after A. Sevchenko», BSU
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4660-0444>;

Yu. Miksyuk,
PhD in Physics and Mathematics,
Associate Professor
of EE «Republican Institute
of Control of Knowledge»
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3969-0454>;

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
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5744-1244>

Поступила в редакцию 29.09.2024.

Received on 29.09.2024.

Проведен расчет геометрии записи и восстановления пропускающих и отражательных голограмм в кристаллах силленитов и отработана методика импульсной записи нескольких голограмм в одной пространственной области кристалла силиката висмута. Разработана схема по одновременной мультиплексной записи отражательных и пропускающих голограмм в кристалле силиката висмута лазерными импульсами наносекундной длительности и проведен расчет угловых и спектральных селективностей записанных решеток. Подобран лазер для одновременного восстановления мультиплексных голограмм.

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

The calculation of the recording geometry and reconstruction of transmission and reflection holograms in sillenite crystals was performed, and a technique for pulse recording of several holograms in one spatial region of a bismuth silicate crystal was developed. A scheme for simultaneous multiplex recording of reflection and transmission holograms in a bismuth silicate crystal by nanosecond laser pulses was developed, and angular and spectral selectivities of the recorded gratings were calculated. A laser was selected for simultaneous reconstruction of multiplex holograms.

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

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (ГР 20211208).

Введение. Фотоиндуцированные эффекты в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов (силикат, титанат и германат висмута) вызывают интерес вследствие их высокой чувствительности к излучению видимой области спектра. Достигнутый в последние два десятилетия прогресс в разработке интерференционных и голографических систем на основе фоторефрактивных кристаллов указывает на перспективность их использования в устройствах оптической памяти, системах оптической обработки световых полей в реальном времени, системах хранения и передачи информации, при создании управляемых элементов адаптивной и волноводной оптики, а также в голографической интерферометрии, включая измерения амплитуд колебаний в субнанометровом диапазоне [1–4].

Одной из характерных особенностей фоторефрактивных кристаллов является существование многочисленных примесных и дефектных центров, имеющих различную природу возникновения и активно участвующих в процессах перераспределения носителей заряда [5]. Кристаллы семейства силленитов являются широкозонными полупроводниками с многочисленными донорными и акцепторными энергетическими уровнями в запрещенной зоне. При освещении кристаллов семейства силленитов в них происходит перераспределение носителей заряда по долгоживущим (секунды, часы) и короткоживущим ловушечным уровням (микро- и миллисекунды), характеристики и механизм проявления которых определяются интенсивностью и длиной волны падающего излучения [6; 7]. При этом формирование и распад динамических решеток происходит в режиме реального времени, что является одним из существенных преимуществ фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов. Такая динамика записанных решеток открывает возможность многократной перезаписи, что определяет возможность использования данных кристаллов в адаптивных интерферометрах и голографических системах записи и обработки информации [3; 4; 8].

Определение оптимальных условий формирования пропускающих и отражательных голограмм в схеме мультиплексной импульсной записи голограмм в кристаллах семейства силленитов и являлось целью исследований, представленных в данной работе.

Основная часть. Приведем расчеты геометрии записи и восстановления пропускающих и отражательных голограмм в кристаллах силленитов.

При записи пропускающих решеток их период определяется известной формулой:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta / 2)}, \quad (1)$$

где λ – длина волны падающего излучения; θ – угол между световыми пучками, записывающими голограмму.

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

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

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

При используемом в эксперименте периоде $\Lambda = 5$ мкм напряженность поля пространственного заряда составляет

$$E_{sc} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \frac{2 \cdot 3,14}{5 \cdot 10^{-6}} = 32 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}. \quad (3)$$

Проведем оценку индуцированного локального изменения показателя преломления среды. Учитывая, что в основе фоторефрактивной нелинейности лежат электрооптические эффекты (Керра и Поккельса), то для расчета изменения показателя преломления используем электрооптические коэффициенты. Типичные параметры кристаллов титаната и силиката висмута приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физические свойства титаната и силиката висмута

Свойства	$\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$
Плотность	$9,14 \div 9,22 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$	$9,14 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$
Электрооптический коэффициент	$r_{41} = 5,17 \cdot 10^{-10} \text{ см/В}$	$r_{41} = 5,1 \cdot 10^{-10} \text{ см/В}$
Диэлектрическая проницаемость	$\epsilon = 56$	$\epsilon = 47$
Ширина запрещенной зоны	$\Delta E_g \approx 3,15 \div 3,25 \text{ эВ}$	$\Delta E_g \approx 3,47 \text{ эВ}$
Показатель преломления	$n \approx 2,54$ при $\lambda = 633 \text{ нм}$	$n \approx 2,25$ при $\lambda = 633 \text{ нм}$

Учитывая, что для указанных кристаллов фоторефрактивный эффект определяется эффектом Поккельса и электрооптическими коэффициентами r_{41} , изменение показателя преломления среды можно найти, используя выражение:

$$\Delta n = \frac{n^3}{2} r E_{sc}, \quad (4)$$

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

В этом случае светоиндуцированное изменение показателя преломления составляет величину $\sim 10^{-6}$.

Максимально возможная дифракционная эффективность объемных пропускающих голограмм при оптимально выбранных кристаллографических направлениях кристаллов определяется формулой:

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda}\right), \quad (5)$$

где d – толщина кристалла.

Подставив значение изменения показателя преломления $\sim 10^{-6}$ с учетом используемой толщины кристалла $d = 2$ мм и приведенных выше параметров, имеем значение дифракционной эффективности $\sim 10^{-4}$:

Для нахождения угловой селективности необходимо найти зависимость дифракционной эффективности от изменения угла падения светового излучения считывания. Данная зависимость при записи голограммы по симметричной схеме задается формулой:

$$\eta = \frac{\sin^2 \sqrt{\nu^2 + \xi^2}}{1 + \frac{\xi^2}{\nu^2}}, \quad (6)$$

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

Как видно из уравнения (6), угловую селективность можно определить как ширину контура зависимости дифракционной эффективности от изменения угла падения восстанавливающего излучения на полувысоте. Расчет, проведенный для угловой селективности объемной фазовой пропускающей голограммы, показал, что для кристалла силиката висмута толщиной 2 миллиметра величина угловой селективности голограммы находится в пределах от $6,8 \cdot 10^{-3}$ до $3,9 \cdot 10^{-2}$ градусов при изменении угла между записывающими пучками от 20 до 160 градусов.

В случае отражательных голограмм интерферирующие излучения падают с двух противоположных сторон кристалла. Предполагается, что падающие волны распространяются симметрично относительно поверхностей кристалла. В результате такая решетка имеет интерференционные плоскости, располагающиеся параллельно поверхностям кристалла, на которые падают записывающие волны. Преимуществом отражательных решеток является возможность их формирования без использования схем деления оптического пучка на сигнальный и опорный за счет отражения проходящего излучения от выходной грани кристалла. Особенностью является возможность записи решеток с малыми периодами, существенно меньшими 1 мкм. В этом случае с уменьшением периода решетки можно ожидать увеличения напряженности электрического поля.

Вначале получим формулу для пространственного периода отражательной голографической решетки. Согласно закону преломления Снеллиуса, показатель преломления кристалла в данном случае выражается следующим соотношением:

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\pi - \theta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi - \theta'}{2}\right)} = \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\cos \frac{\theta'}{2}}, \quad (7)$$

где θ' – угол между направлениями распространения волн внутри кристалла.

Тогда период решетки записывается в виде:

$$\Lambda = \frac{\lambda'}{2 \sin(\theta'/2)} = \frac{\lambda}{2 \sqrt{n^2 - \cos^2(\theta/2)}}. \quad (8)$$

Здесь $\lambda' = \lambda / n$ – длина волны излучения в кристалле.

Расчет периода дифракционной решетки для длины волны записывающего излучения в воздухе $\lambda = 532$ нм (вторая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате), показателя преломления $n \approx 2,3$ при изменении углов θ от 0 до 180 градусов дает значения периода $\Lambda \sim 120$ – 130 нм.

На основе проведенных тестовых экспериментов разработана схема по одновременной мультиплексной записи отражательных и пропускающих голограмм в кристалле силиката висмута лазерными импульсами наносекундной длительности. Особенностью данной схемы является равенство длин оптического пути для излучения, формирующего голограмму.

Как показали численные расчеты, вследствие высокой спектральной селективности отражательной голограммы, при записи излучением с длиной волны 532 нм, диапазон длин волн, позволяющий восстановить данную голограмму при изменении угла считывания, ограничен в промежутке от 478 до 594 нм.

Используемый в работе кристалл силиката висмута имеет высокое поглощение в синей области видимого спектра, поэтому при толщине кристалла силиката висмута 2 мм для восстановления было решено использовать полупроводниковый лазер с длиной волны 520 нм. В таком случае, для полноценной работы с предложенной схемой угол между двумя лучами, формирующими отражательную голограмму, не должен быть меньше 52 градусов. Тогда периоды Λ пропускающей решетки при углах падения записывающего излучения от 26 до 90 градусов будут монотонно убывать и лежать в диапазоне от 607 нм до 266 нм соответственно, а для отражательной решетки при тех же углах падения также монотонно убывать от 132 нм до 118 нм. В связи с полученными данными и для того, чтобы упростить схему, был выбран угол между записывающими волнами, равный 90°. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

Заметим, что предложенная схема, кроме изменения углов схождения лучей, формирующих и восстанавливающих голограмму, может быть изменена. Например, вместо зеркал 5 и 6 могут быть использованы призмы полного внутреннего отражения, вместо делительного куба 4 – полупрозрачное зеркало. Также допустимо использование вместо зеркала 3 обыкновенной стеклянной пластинки.

Как показали предварительные расчеты, при реализации мультиплексной записи голограмм углы падения лазерных пучков на фото-

рефрактивный кристалл могут существенно отличаться от нормального угла. В этом случае существенный вклад могут вносить френелевские потери на отражение. Ситуация особенно усложняется вследствие больших значений показателя преломления для кристаллов семейства силленитов $\sim 2,2\text{--}2,6$. В этом случае коэффициент френелевского отражения даже при нормальном падении составляет 15–20 %. Результаты проведенных расчетов значений коэффициентов отражения записывающих и считывающих волн показывают, что при изменении угла падения записывающего излучения в пределах от 26 до 90°, коэффициент отражения S-поляризованной волны записывающего излучения монотонно возрастает от 0,18 до 1; коэффициент отражения p-поляризованной волны записывающего излучения при углах от 26° до 65° монотонно убывает от 0,12 до 0, а от 68° до 90° монотонно возрастает от 0,002 до 1. В свою очередь, согласно закону Брэгга, восстанавливающее излучение будет падать под другими углами, чем записывающее. Тогда коэффициент отражения S-поляризованной волны восстанавливающего пропускающую решетку излучения при тех же углах монотонно возрастает от 0,176 до 0,658, а коэффициент отражения P-поляризованной волны восстанавливающего пропускающую решетку излучения от 26° до 68° монотонно убывает от 0,122 до 0, а от 71° до 90° монотонно возрастает от 0 до 0,096; коэффициент отражения s-поляризованной волны восстанавливающего отражательную решетку излучения монотонно возрастает от 0,148 до 0,393 и коэффициент отражения P-поляризованной волны восстанавливающего отражательную решетку излучения монотонно убывает от 0,148 до 0,006.

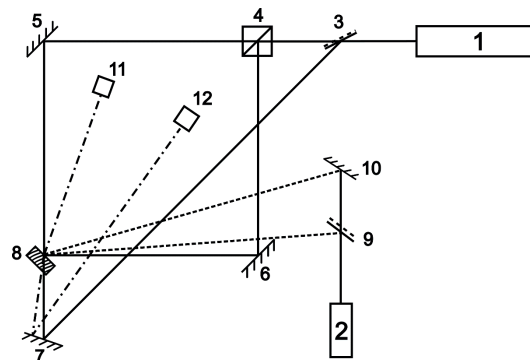


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки по одновременной мультиплексной записи отражательных и пропускающих голограмм в кристалле силиката висмута лазерными импульсами наносекундной длительности: 1 – импульсный Nd:YAG лазер; 2 – полупроводниковый лазер; 3, 9 – полупрозрачные зеркала; 4 – делительный куб; 5, 6, 7, 10 – глухие зеркала; 8 – кристалл силиката висмута; 11, 12 – фотодетекторы

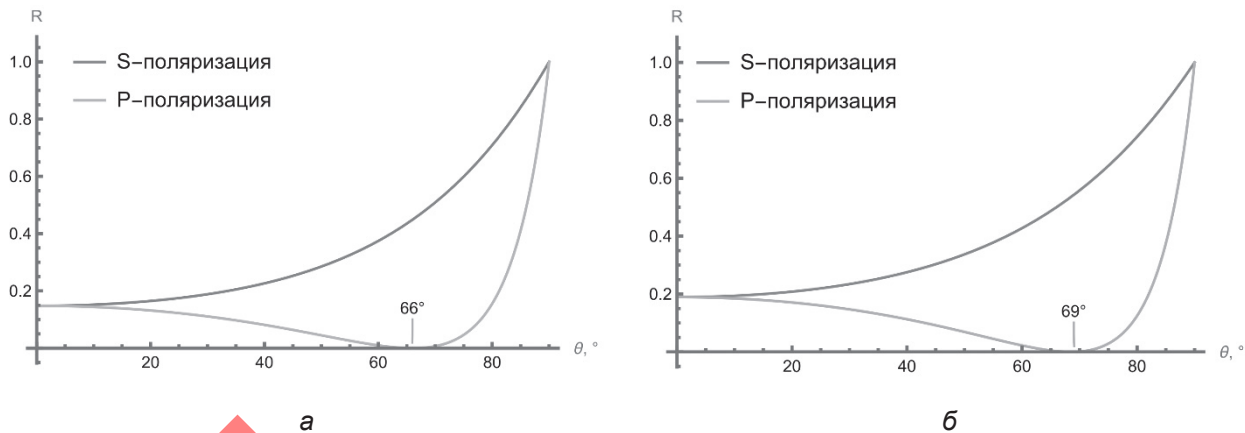


Рисунок 2 – Графики зависимости коэффициента отражения от угла падения для кристаллов BSO (а) и BTO (б). Отдельно указан угол Брюстера

Результаты расчетов показывают, что целесообразно использовать Р-поляризацию лазерного излучения, для которой коэффициенты в выбранной схеме эксперимента для считывающего излучения не превышают 15 %. При этом в диапазоне углов 65° – 70° для длин волн записывающего и считывающего излучения коэффициент отражения близок к нулю (углы близки к углу Брюстера).

Поэтому на основе полученных данных на схеме рисунка 1 выбран угол между записывающими волнами, равный 90° , и Р-поляризация лазерного излучения.

Заключение. Таким образом, в работе проведен расчет геометрии записи и восстановления пропускающих и отражательных голограмм в кристаллах силленитов, отработана методика импульсной записи нескольких голограмм в одной пространственной области кристалла силиката висмута. Разработана схема по одновременной мультиплексной записи отражатель-

ных и пропускающих голограмм в кристалле силиката висмута лазерными импульсами наносекундной длительности и проведен расчет угловых и спектральных селективностей записанных решеток, подобран лазер для одновременного восстановления мультиплексных голограмм. Показано, что вследствие высокой спектральной селективности отражательной голограммы, при записи излучением с длиной волны 532 нм, диапазон длин волн, позволяющий восстановить данную голограмму, ограничен в промежутке от 478 нм до 594 нм. Учитывая спектр поглощения кристалла силиката висмута, предложено использовать полупроводниковый лазер с длиной волны 520 нм. При этом угол между двумя лучами, формирующими отражательную голограмму, не должен быть меньше 52 градусов. В таком случае периоды пропускающей решетки будут лежать в диапазоне от 266 нм до 607 нм, а для отражательной – от 118 нм до 132 нм.

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. Dynamic Denisyuk holograms in cubic photorefractive crystals / S. M. Shandarov, N. I. Burimov, Yu. N. Kul'chin [et. al.] // Quantum Electronics. – 2008. – Vol. 38. – No. 11. – P. 1059–1069.
3. Kamshilin, A. A. Adaptive interferometry with photorefractive crystals / A. A. Kamshilin, R. V. Romashko, Y. N. Kulchin // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 105. – No. 3. – P. 031101.
4. Ромашко, Р. В. Адаптивная голографическая интерферометрия: техника, прогресс и приложения / Р. В. Ромашко // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2021. – No. 4. – С. 40–47.

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. Dynamic Denisyuk holograms in cubic photorefractive crystals / S. M. Shandarov, N. I. Burimov, Yu. N. Kul'chin [et.al.] // Quantum Electronics. – 2008. – Vol. 38. – No. 11. – P. 1059–1069.
3. Kamshilin, A. A. Adaptive interferometry with photorefractive crystals / A. A. Kamshilin, R. V. Romashko, Y. N. Kulchin // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 105. – No. 3. – P. 031101.
4. Romashko, R. V. Adaptivnaya golograficheskaya interferometriya: tekhnika, progress i prilozheniya / R. V. Romashko // Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. – 2021. – No. 4. – S. 40–47.

5. Кристаллы $\text{Bi}_{12}\text{Si}_x\text{O}_{20-5}$ со структурой силленита. Синтез, строение, свойства / Ю. Ф. Каргин, В. И. Бурков, А. А. Мар'ин, А. В. Егорышева. – М.: Изд-во ИОХН РАН. – 2004. – 312 с.
6. Light-induced effects in sillenite crystals with shallow and deep traps / T. Kornienko, M. Kisteneva, S. Shandarov, A. Tolstik // *Physics Procedia*. – 2017. – Vol.86. – P. 105–112.
7. Фотоиндуцированное поглощение и импульсная запись динамических голограмм в кристаллах силиката висмута / И. Г. Даденков, А. Л. Толстик, Ю. И. Миксюк, К. А. Саечников // *Оптика и спектроскопия*. – 2020. – Т. 128. – No. 9. – С. 1290–1295.
8. Adaptive Interferometry for High-Sensitivity Optical Fiber Sensing / A. Peigne [et al.] // *J. Lightwave Technol.* – 2016. – No. 34. – P. 4603–4609.
5. Kristally $\text{Bi}_{12}\text{Si}_x\text{O}_{20-5}$ so strukturoj sillenita. Sintez, stroenie, svojstva / Yu. F. Kargin, V. I. Burkov, A. A. Mar'in, A. V. Egorysheva. – M.: Izd-vo IOHN RAN. – 2004. – 312 s.
6. Light-induced effects in sillenite crystals with shallow and deep traps / T. Kornienko, M. Kisteneva, S. Shandarov, A. Tolstik // *Physics Procedia*. – 2017. – Vol.86. – P. 105–112.
7. Fotoinducirovannoe pogloshchenie i impul'snaya zapis' dinamicheskikh gologramm v kristallah silikata vismuta / I. G. Dadenkov, A. L. Tolstik, Yu. I. Miksyuk, K. A. Saechnikov // *Optika i spektroskopiya*. – 2020. – T. 128. – No. 9. – S. 1290–1295.
8. Adaptive Interferometry for High-Sensitivity Optical Fiber Sensing / A. Peigne [et al.] // *J. Lightwave Technol.* – 2016. – No. 34. – R. 4603–4609.