

из-за отсутствия таких настроек в приложении.

В заключение отметим, что оба способа можно использовать для записи зависимости амплитуды колебаний от времени и дальнейшего анализа, так как сравнительная диаграмма, приведённая на рис. 6 показывает очень хорошее совпадение результатов.

#### Список использованных источников

1. Мякишев Г. Я. Физика. Колебания и волны. 11 кл. Профильный уровень: учеб. для общеобразоват. учреждений / Г. Я. Мякишев, А. З. Сиянков. 9-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2010. 287с.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. I. Механика. — 4-е изд., стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2005. - 560с.
3. Путилов К. А. Курс физики: В 3 т. Т. 1. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика / К. А. Путилов. – 11-е изд. – М.: ГИ ФМЛ, 1963. – 560с.
4. НИЯУ МИФИ. 2.3 Затухающие колебания // [Электронный ресурс]. URL: [https://old.mephi.ru/students/v1/physics/oscillations/2\\_03\\_damped.php](https://old.mephi.ru/students/v1/physics/oscillations/2_03_damped.php). (дата обращения: 06.10.2024). — Режим доступа: свободный.
5. Бобылев Ю. В., Грибков А. И., Романов Р. В. Демонстрация и графический анализ затухающих колебаний простого маятника // XLIX Международная научно-методическая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов, магистрантов, соискателей «Новая дидактика и трансформация педагогического образования» 18-23 мая 2023 г. Тула. // Сетевое издание (электронный научно-методический журнал) Вестник ГОУ ДПО ТО «ИПК и ППРО ТО». Тульское образовательное пространство, Тула, 2023, № 3/2, 2023. июль – сентябрь, С.81-84.

**УДК 535.343**

**И. Г. Даденков<sup>1</sup>, К. А. Саечников<sup>2</sup>**

**I. G. Dadenkov<sup>1</sup>, K. A. Saechnikov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь)

<sup>2</sup> УО «Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка»

(Минск, Беларусь)

### **МЕТОДИКА МУЛЬТИПЛЕКСНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЗАПИСИ ПРОПУСКАЮЩИХ И ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ**

### **METHODOLOGY OF MULTIPLEX PULSE RECORDING OF TRANSMISSION AND REFLECTION HOLOGRAMS IN PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS**

Предложена 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.

A methodology of pulsed recording of several holograms in one spatial region of a bismuth silicate crystal is proposed and developed. A scheme for simultaneous multiplex recording of reflective and transmissive holograms in a bismuth silicate crystal with laser pulses of nanosecond duration was developed, and the angular and spectral selectivities of the recorded gratings were calculated.

**Ключевые слова:** фоторефрактивные кристаллы, динамические решетки, голографическая интерферометрия, силикат висмута, импульсная запись.

Keywords: photorefractive crystals, dynamic gratings, holographic interferometry, bismuth silicate, pulse recording.

Фотоиндуцированные эффекты в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов (силикат, титанат и германиат 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].

На основе проведенных теоретических расчетов разработана оптическая схема и методика мультиплексной импульсной записи пропускающих и отражательных голограмм в кристаллах семейства силленитов.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

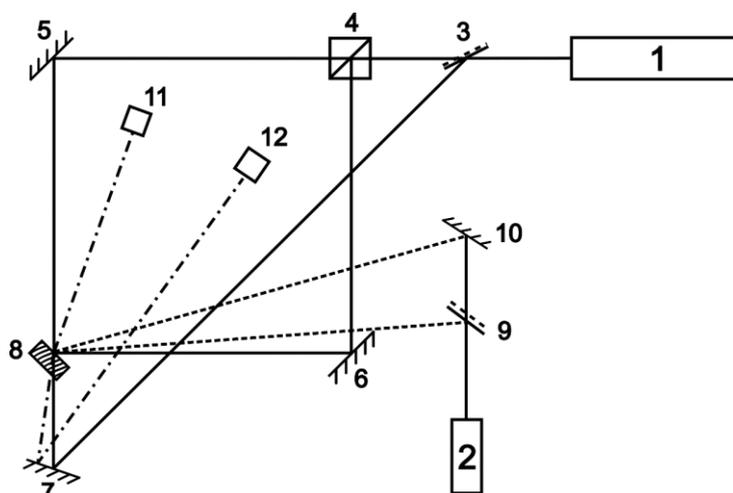


Рис. 1. – Схема экспериментальной установки по одновременной мультиплексной записи отражательных и пропускающих голограмм в кристалле силиката висмута лазерными импульсами наносекундной длительности: 1 – импульсный Nd:YAG лазер; 2 – полупроводниковый лазер; 3, 9 – полупрозрачные зеркала; 4 – Делительный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

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. Расчеты показали, что в таком случае периоды 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 так же монотонно убывая 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 градусов.

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 пластины.

Предварительные расчеты показали, что при реализации мультиплексной записи голограмм углы падения лазерных пучков на фоторефрактивный 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  $\sim 2,2 - 2,6$ . В этом случае коэффициент френелевского отражения даже при нормальном падении составляет 15 – 20%.

В работе так же рассчитывались коэффициенты отражения записывающих и считывающих s и p-поляризованных волн.

На рисунке 2 представлены графики зависимостей коэффициентов отражения от угла падения s и p-поляризованных волн для кристаллов BSO(а) и ВТО(б).

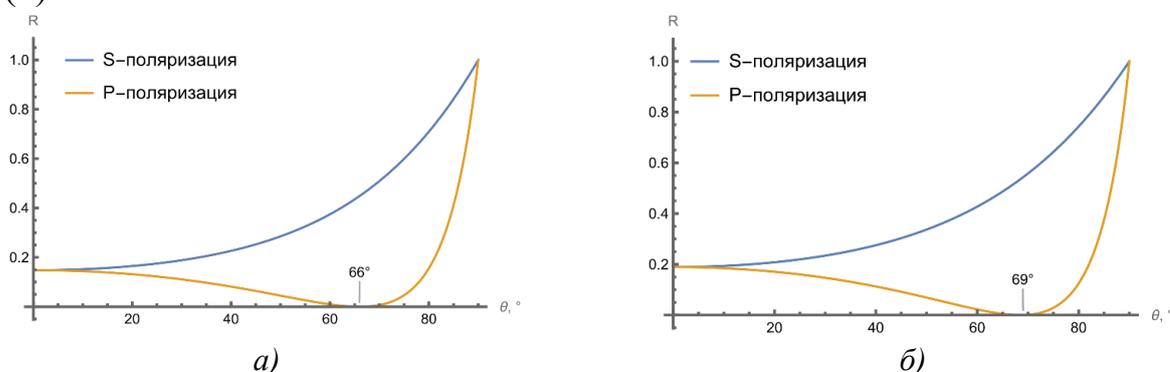


Рис. 2. – Графики зависимости коэффициента отражения от угла падения для кристаллов BSO(а) и ВТО(б). Отдельно указан угол Брюстера

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

Таким образом, в работе предложена 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.

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

#### Список использованных источников

1. Петров, М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. – СПб.: Наука, 1992. – 317с.

2. Shandarov, S.M. Dynamic Denisyuk holograms in cubic photorefractive crystals / S.M. Shandarov, N.I. Burimov, Yu.N. Kul'chin, R.V. Romashko, A.L. Tolstik, V.V. Shepelevich // 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. – № 4. – С. 40–47.

5. Каргин, Ю.Ф., Кристаллы  $\text{Bi}_{12}\text{Si}_6\text{O}_{20}\text{-}\delta$  со структурой силленита. Синтез, строение, свойства / Ю.Ф. Каргин, В.И. Бурков, А.А. Марьин, А.В. Егорышева // М.: Изд-во ИОХН РАН. – 2004. – 312с.

УДК 372.853

**А. А. Есис<sup>1</sup>, К. Н. Баранец<sup>2</sup>**

A. A. Yesis<sup>1</sup>, K. N. Baranets<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГУО «Средняя школа №41 г. Минска»

<sup>2</sup> ГУО «Средняя школа №59 г. Минска»

(Минск, Республика Беларусь)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕЙМИФИКАЦИИ ПРИ ОБУЧЕНИИ ФИЗИКЕ УЧАЩИХСЯ ВТОРОЙ СТУПЕНИ ОБЩЕГО СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

### **THE USE OF GAMIFICATION ELEMENTS IN TEACHING PHYSICS TO STUDENTS OF THE SECOND STAGE OF GENERAL SECONDARY EDUCATION**

В статье раскрывается потенциал использования элементов геймификации в процессе обучения физике учащихся второй ступени общего среднего образования. Чаще всего игровые практики используются при организации внеурочной деятельности. В данной статье рассматривается использование игровой валюты как один из способов геймификации процесса обучения физике.

The article reveals the potential of using gamification elements in the process of teaching physics to students of the second stage of general secondary education. Most often, gaming practices are used when organizing extracurricular activities. This article discusses the use of game currency as one of the ways to gamify the physics teaching process..

**Ключевые слова:** Геймификация; геймифицированный урок; физика; обучение физике; игровая валюта.

Keywords: Gamification; gamified lesson; physics; physics training; game currency.

Игровые технологии используются в педагогической практике с давних времен. Игра – это один из видов деятельности человека, наряду с учением и трудом. В различных областях науки, таких как философия, психология,