

УДК 535.41

*В.М. Петров, А.В. Хоменко,
Я.А. Криницкий, М.А. Гарсиа*

**АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО
ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА
НА ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕШЕТКАХ**

*V.M. Petrov¹, A.V. Khomenko²,
Ya.A. Krinitsky³, M.A. Garcia⁴*

^{1,3} St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

^{2,4} Ensenada Center for Scientific Research and Higher Education,
Carretera Ensenads-Tijuana 3918, Zona Playitas, 22860, Ensenada, Baja California, Mexico.

**SENSITIVITY ANALYSIS OF AN OPTICAL HOLOGRAPHIC
INTERFEROMETER BASED ON REFLECTIVE DYNAMIC GRATINGS**

Статья посвящена исследованию дифракционных решеток в кристаллах селенита, которые позволяют создавать высокочувствительные адаптивные голографические интерферометры. Приведены результаты исследования дифракционной эффективности решеток, а также чувствительности интерферометра на их основе в зависимости от различных факторов, таких как геометрические размеры кристалла и его ориентация. Даются практические рекомендации по оптимизации параметров интерферометра.

ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА. КРИСТАЛЛ СИЛЛЕНИТА. ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ АДАПТИВНЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР. ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИНТЕРФЕРОМЕТРА.

The article is related to investigation of diffraction gratings in sillenite crystals which are suitable for creating high-sensitive adaptive holographic interferometers. The article presents the results of study of the diffraction gratings efficiency and also the sensitivity of the interferometer based thereon, depending on various factors, such as crystal geometry and orientation.

DIFFRACTION GRATINGS. SILLENITE CRYSTALS. HIGH-SENSITIVE ADAPTIVE HOLOGRAPHIC INTERFEROMETERS. DIFFRACTION EFFICIENCY. INTERFEROMETER SENSITIVITY.

Адаптивные голографические интерферометры на основе отражательных динамических решеток уже несколько десятков лет успешно используются для исследования колебаний поверхности с амплитудой

$10^{-8} - 10^{-9}$ м [1, 2]. Основным элементом таких интерферометров являются фоторефрактивные кристаллы, в которых и создается голографическая решетка. Не претендуя на полноту, приведем здесь только некоторые

из них: BaTiO_3 [3 – 5], InP [6], GaAs [7, 8], силлениты [9, 10], GaP [11]. Отметим, что кристаллы группы силленитов ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$) выгодно отличаются от других фоторефрактивных кристаллов относительно низкой ценой; они могут быть выращены до больших размеров и высокого оптического качества, они не требуют специальных мер предосторожности при работе. Силлениты имеют короткое время записи решетки, что обеспечивает частоту отсечки 1 – 2 кГц. Это позволяет в значительной мере подавлять внешние шумы.

Рассматриваемые здесь интерферометры успешно использовались для направленного детектирования ультразвуковых волн, возникающих под действием лазерного импульса [6, 7, 10], для измерения малых периодических колебаний поверхности и слабых фазомодулированных оптических сигналов [4, 5, 9, 12].

Несколько лет назад при помощи адаптивных голографических интерферометров были экспериментально исследованы такие явления, как давление света, создаваемое слабым (не более 1 мВт/мм²) пучком света, и взаимодействие Казимира между макрообъектами [4, 12]. Напомним, что характерная амплитуда колебания поверхности в этих случаях составляет доли нанометра. Такая чувствительность позволяет использовать адаптивные голографические интерферометры как для создания и исследования микро- и наноразмерных устройств, так и для исследования новых физических явлений [13, 14].

Очевидно, что для надежного обеспечения высокой чувствительности требуется чрезвычайно точная настройка интерферометра. Первый этап настройки голографического интерферометра состоит в линеаризации выхода. Отметим, что эта задача уже успешно решена [3, 5]. Вторым важным этапом – это оптимизация условий записи отражательной голографической решетки с учетом длины кристалла, оптической активности и поглощения света фоторефрактивным кристаллом. Оптимизация условий записи может производиться исходя из трех критериев: величины дифракционной эффективности решетки, отношения сигнал/шум

на выходе интерферометра или амплитуды первой гармоники электрического сигнала на выходе фотоприемника.

Обычно голографические решетки, в том числе и динамические, характеризуются дифракционной эффективностью – отношением интенсивности света, попадающего в первый порядок дифракции, к мощности падающего на решетку (т. е. считываемого) света. Однако для использования такой решетки в интерферометре простое достижение максимальной дифракционной эффективности еще не гарантирует эффективную работу интерферометра. Именно решению данной задачи и посвящена настоящая работа.

Численный анализ и экспериментальные результаты

Известно, что отношение сигнал/шум для интерферометра с малой амплитудой фазовой модуляции может быть представлено как [15]:

$$\text{SNR} = Q \frac{\Delta I}{\sqrt{I_{av}}},$$

где $Q = \sqrt{\frac{\eta}{4hv\Delta f}}$; ΔI – амплитуда первой гармоники сигнала (или амплитуда модуляции интенсивности света) на выходе интерферометра; I_{av} – средняя интенсивность света, измеренная после анализатора; η – квантовая эффективность фотоприемника, hv – энергия фотона, Δf – полоса регистрации.

Отметим, что I_{av} зависит от дифракционной эффективности решетки G , поляризации входного луча и ориентации анализатора.

В качестве следующего шага введем относительную чувствительность интерферометра ξ , которая не зависит от параметров фотоприемника и которая показывает, насколько чувствительность интерферометра отличается от теоретического предела [5]:

$$\xi = \sqrt{\frac{2}{I_{av} I_{out}} \frac{\Delta I}{\Delta \varphi}},$$

где I_{out} – мощность света на выходе лазера; $\Delta \varphi$ – амплитуда фазовой модуляции, которая создает модуляцию интенсивности ΔI .

Таким образом, для того, чтобы опреде-

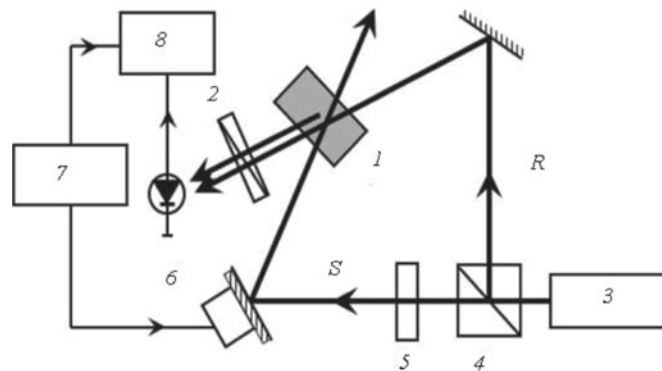


Рис. 1. Схема интерферометра:

1 – фоторефрактивный кристалл, 2 – анализатор, 3 – лазер на Nd:YAG,
4 – светоделитель, 5 – четвертьволновая пластина, 6 – зеркало на пьезопреобразователе,
7 – синхрогенератор, 8 – фазовый синхронный детектор

лечь ξ , надо вычислить ΔI и I_{av} . Для вычисления можно использовать известные уравнения двухволнового взаимодействия для векторных стационарных амплитуд S и R взаимодействующих волн. Процедура решения уравнений подробно описана в работе [5].

Теперь обратимся к эксперименту (рис. 1). Мы использовали отражательную геометрию записи решетки. Кристалл 1 освещался с противоположных сторон сигнальным (S) и опорным (R) пучками. Для этого мы использовали вторую гармонику Nd:YAG лазера ($\lambda = 532$ нм). Интенсивность пучков составляла примерно 20 мВт/мм². Полный угол между записывающими пучками составлял примерно 170° . Четвертьволновая

пластина была установлена в S -пучок. Анализатор 2 был установлен перед фотоприемником, что создавало двухволновое взаимодействие между прошедшей частью R -пучка и прорифрагировавшей частью S -пучка. Опорный пучок имел вертикальную поляризацию, а поляризация сигнального пучка изменялась при помощи четвертьволновой пластины 5, которая создавала фазовый сдвиг между вертикальной и горизонтальной компонентами. Отражательная решетка записывалась за счет фоторефрактивного эффекта интерференционной картиной, которая создавалась параллельными компонентами R - и S -пучков. Обе компоненты S -пучка (вертикальная и горизонтальная) отражаются от фоторефрактивной решетки.

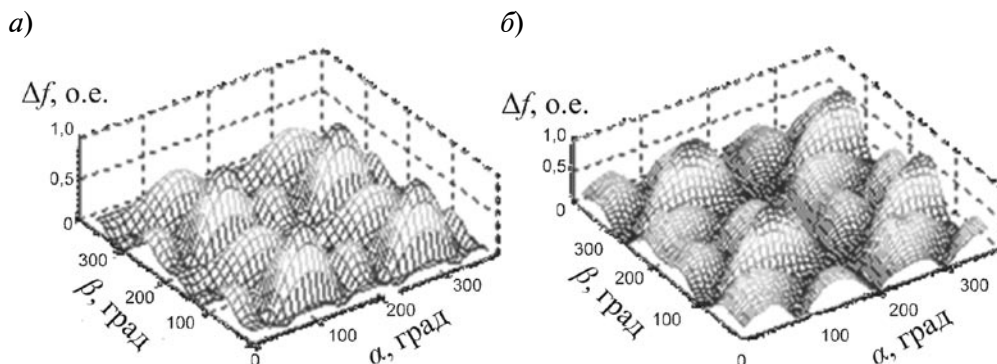


Рис. 2. Результаты измерения (а) и вычислений (б) уровня сигнала первой гармоники монокристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ в зависимости от ориентаций четвертьволновой пластины (угол α) и анализатора (угол β).

Длина образца $L = 5,0$ мм, свет распространялся вдоль кристаллографической оси [001]

Компонента поляризации S -пучка, которая ортогональна поляризации R -пучка, имеет фазовый сдвиг $\pi/2$, что приводит к линейризации выхода.

Нами были исследованы образцы кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ со значениями длины 1,2, 3,0, 5,0 и 12,0 мм вдоль направления распространения света и образцы кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, длиной 5,0 мм. Ориентация образцов была такова, что свет в них распространялся вдоль кристаллографических осей [001], [112], [111].

На рис. 2, *a* показаны экспериментальные результаты измерения ΔI в зависимости от углов ориентации четвертьволновой пластины α и ориентации анализатора β . Каждый угол отсчитывался от вертикальной оси. Кроме проведенных измерений, нами были

выполнены вычисления той же самой зависимости по методике, описанной в работе [5]. Амплитуда первой гармоники вычислялась как функция входной поляризации R - и S -пучков, угла анализатора, толщины образца L вдоль направления распространения света и оптической активности кристалла ρ . На рис. 2, *b* показаны результаты вычисления для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. Зависимость, представленная на рис. 2, является типичной. Аналогичные результаты были получены для всех типов кристаллов и их ориентаций. Измеренные и вычисленные зависимости имеют характерный набор периодически расположенных максимумов. Установлено что имеется удовлетворительное согласие теории и эксперимента: величина ΔI достигает своего максимума при угле чет-

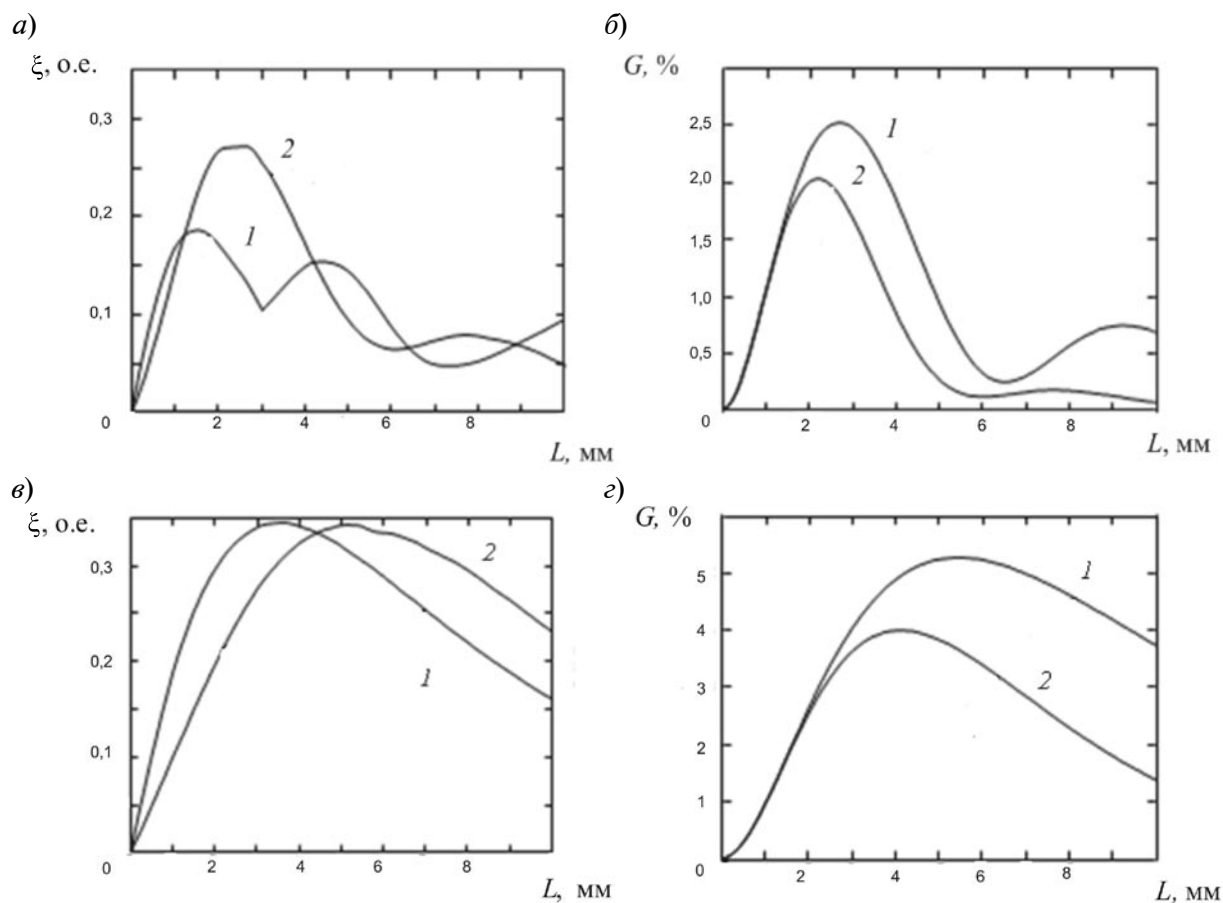


Рис. 3. Расчетные зависимости относительной чувствительности интерферометра (*a, в*) и дифракционной эффективности решетки (*б, г*) от длины образцов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (*a, б*) и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (*в, г*); свет распространялся вдоль их кристаллографических осей [001]; $N_A = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 1, 2 – линейная поляризация лазерного излучения вдоль направлений [100] и [110] соответственно



вертьволновой пластинки, равном примерно 130° , и угле анализатора, примерно равном 90° (здесь и далее углы отсчитываются относительно вертикали). Аналогичные зависимости, полученные для других кристаллов и других ориентаций, также имеют совпадение с точностью примерно 10° . Отсюда мы делаем вывод, что наша численная модель правильно описывает эксперимент и может быть использована для дальнейшего решения задачи.

На следующем этапе нами были вычислены зависимости амплитуды первой гармоники сигнала ΔI , относительной чувствительности интерферометра ξ , и дифракционной эффективности решетки G в зависимости от длины кристалла для всех указанных ориентаций. Наиболее информативные из них приведены на рис. 3, а, б.

Зависимости величин ξ и G от L для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ были рассчитаны для относительно малых значений концентрации мелких ловушечных уровней N_A [2]. Аналогичные зависимости для соединения $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ представлены на рис. 3, в, г. Результаты вычислений для $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ оказались подобными результатам вычислений для $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, и в статье не приводятся.

Из представленных на рис. 3 результатов видно, что для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ наибольшее значение чувствительности интерферометра $\xi \approx 0,27$ достигается на длине $L \approx 2,6$ мм (кривая 2). Достижимая в этом случае величина дифракционной эффективности решетки $G \approx 2,0$ % (кривая 2 на рис. 3, б) не является максимальной. Абсолютное максимальное значение $G \approx 2,5$ % достигается при угле поворота входной поляризации $+45^\circ$ и при $L \approx 3,0$ мм. Однако чувствительность ξ в этом случае не превышает значения 0,11.

Обсуждение результатов

Наиболее интересным результатом данной работы следует считать то, что оптимальная длина кристалла, обеспечивающая максимальную дифракционную эффективность решетки, в общем случае не совпадает с оптимальной длиной, обеспечивающей максимальную относительную чувствительность интерферометра. Для практических применений это означает, что выбор длины кристалла должен основываться либо на требуемой чувствительности интерферометра, либо на требуемой дифракционной эффективности решетки. Необходимо учитывать, что в некоторых случаях эти требования могут вступать в противоречия. Так например, если увеличить дифракционную эффективность решетки в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (ориентация [100]) с использованием входной поляризации, повернутой на 45° , то относительная чувствительность интерферометра уменьшается в 2,2 раза. При этом значение G увеличивается не более, чем на 30 % (см. рис. 3, а, б).

Для построения интерферометра с максимально возможной относительной чувствительностью можно рекомендовать кристалл $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ с ориентацией, в которой свет распространяется вдоль оси [001], и длиной кристалла примерно 2,5 – 3,0 мм. Однако эта ориентация является чувствительной к ориентации входной поляризации. Другой привлекательный случай – использовать ориентацию [111], которая не чувствительна к ориентации поляризации, однако, относительная чувствительность будет примерно в 6 раз ниже, чем у интерферометра с ориентацией кристалла, у которой свет распространяется вдоль оси [001].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hall, T.J. Detector of an optical-fiber acoustic sensor using dynamic holographic interferometry [Text] / T.J. Hall, M.A. Fiddy, M.S. Ner // Opt. Lett. – 1980. – Vol. 5. – P. 485–487.
2. Stepanov, S.I. Application of photorefractive crystals [Text] / S.I. Stepanov // Rep. Prog. Phys. – 1994. – Vol. 57. – P. 39–116.
3. Rossomakhin, I.M. Linear adaptive inter-

- ferometer via diffusion recording in cubic photorefractive crystals [Text] / I.M. Rossomakhin, S.I. Stepanov // Opt. Com. – 1991. – Vol. 86. – P. 199–204.

4. Petrov, V.M. Optical detection of the Casimir force between the macroscopic objects [Text] / V.M. Petrov, M.P. Petrov, V.V. Bryksin [et al.] // Opt. Lett. – 2006. – Vol. 31. – P. 3167–3169.

5. **Khomenko, A.V.** Highly sensitive adaptive interferometer based on reflection photorefractive grating in BaTiO₃:Co [Text]/ A.V. Khomenko, V.M. Petrov // Journal of Holography and Speckle. – 2009. – Vol. 5. – P. 238–242.

6. **Delaye, P.** Detection of ultrasonic motion of a scattered surface using photorefractive InP:Fe under an applied dc field [Text] / P. Delaye, A. Blouin, D. Drolet [et al.] // J. Opt. Soc. Am. B. – 1997. – Vol. 14. – P. 1723–1734.

7. **Blouin, A.** Detection of ultrasonic motion of a scattering surface by two-wave mixing in a photorefractive GaAs crystal [Text] / A. Blouin, J.-P. Monchalain // Appl. Phys. Lett. – 1994. – Vol. 65. – P. 932–934.

8. **Campagne, B.** Compact and fast response ultrasonic detection device based on two-wave mixing in a gallium arsenide photorefractive crystal [Text] / B. Campagne, A. Blouin, L. Pujot, J.-P. Monchalain // Rev. Sci. Instrum. – 2001. – Vol. 72. – P. 2478–2482.

9. **Petrov, V.M.** Enhancing of the sensitivity of an adaptive holographic interferometer using the non-Bragg diffraction [Text] / V.M. Petrov, C. Denz, J. Petter, T. Tshudi // Opt. Lett. – 1997. – Vol. 22. – P. 1902–1904.

10. **Stepanov, S.I.** Directional detection of laser-generated ultrasound with an adaptive two-wave mixing photorefractive configuration [Text] / S.I. Stepanov, V.M. Petrov, P. Rodriguez, R. Lopez // Opt. Comm. – 2001. – Vol. 187. – P. 249–255.

11. **Kamshilin, A.A.** Fast adaptive interferometer with a photorefractive GaP crystal [Text] / A.A. Kamshilin, V.V. Prokofiev // Opt. Lett. – 2002. – Vol. 27. – P. 1711–1723.

12. **Petrov, V.** Precise sub-nanometer control of the position of a macro-object by light pressure [Text] / V. Petrov, J. Hahn, J. Petter [et al.] // Opt. Lett. – 2005. – Vol. 30. – P. 3138–3140.

13. **Decca, R.S.** Casimir force between a micro-fabricated elliptical cylinder and plate [Text] / R.S. Decca, E. Fischbach, G.L. Klimchitskaya [et al.] // Physical Review A. – 2011. – Vol. 84. – P. 042502.

14. **Bordag, M.** Advances in the Casimir effect [Text]: International series of monographs on physics / M. Bordag, G.L. Klimchitskaya, U. Mohideen, V.M. Mostepanenko. – Oxford: University Press, 2009. – 752 p.

15. **Wagner, J.W.** Theoretical noise-limited sensitivity of classical interferometry [Text] / J.W. Wagner, J.B. Spiecer // J. Opt. Soc. Am. B. – 1987. – Vol. 4. – P. 1316–1326.

ПЕТРОВ Виктор Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vikpetroff@mail.ru

ХОМЕНКО Анатолий Васильевич – научный сотрудник департамента прикладной оптики Центра научных исследований и высшего образования г. Энсенада, Мексика.

Carretera Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, 22860, Ensenada, Baja California, Mexico

КРИНИЦКИЙ Яков Андреевич – аспирант кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
jackobian@inbox.ru

ГАРСИЯ САРАТЕ Мария Алехандро – аспирант департамента прикладной оптики Центра научных исследований и высшего образования г. Энсенада, Мексика.

Carretera Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, 22860 Ensenada, Baja California, Mexico