



НОВЫЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ, ПОСТРОЕННЫЕ НА ОСНОВЕ РЕЛЬЕФНЫХ ОТРАЖАЮЩИХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ

В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов, Н. В. Суетин
Российский университет дружбы народов
(RUDN University), Москва

В статье рассмотрен ряд новых схем, предназначенных для измерения малых угловых смещений и колебаний, для модуляции лазерного излучения, а также для фильтрации спектра оптического излучения в видимом и в инфракрасном диапазоне длин волн. В основе работы этих схем лежат эффекты, наблюдаемые при отражении лазерного пучка от глубоких дифракционных рельефных структур, имеющих прямоугольный профиль, с глубиной рельефа от четверти длины волны до нескольких длин волн излучения лазера.

Статья поступила в редакцию 13.02.2019

Статья принята к публикации 27.02.2019

Области применений описываемых устройств разнообразны. Например, датчики малых угловых смещений и колебаний могут быть применены при исследовании вибраций и при конструировании сейсмометров и наклономеров. Модулятор с механическим приводом работает в области низких частот модуляции, но может обеспечить аналоговую модуляцию мощности излучения с различными глубинами модуляции от нуля до ста процентов. Оптические фильтры, построенные на основе глубоких рельефных отражающих структур, имеют осциллирующие зависимости коэффициента передачи от длины волны. Можно выбрать параметры таким образом, чтобы фильтр имел нулевой коэффициент передачи на заданной длине волны и близкий к единице коэффициент

NEW OPTOELECTOR SCHEMES CONSTRUCTED BASED ON RELIEF REFLECTIVE DIFFRACTIVE STRUCTURES WITH RECTANGULAR PROFILE

V. A. Komotskii, Yu. M. Sokolov, N. V. Suetin
Peoples Friendship University of Russia.
(RUDN University) Moscow, Russian Federation

The article describes a number of new schemes designed to measure small angular displacements and oscillations, to modulate laser radiation, and also to filter the spectrum of optical radiation in the visible and infrared wavelengths. The operation of these schemes is based on the effects observed when a laser beam is reflected from deep diffractive relief structures with a rectangular profile, with a relief depth from a quarter of the wavelength to several wavelengths due to laser radiation.

Article received for editing 13.02.2019

Article accepted for publication 27.02.2019

INTRODUCTION

The work of the presented schemes is based on diffraction effects observed when a laser beam is reflected from a deep relief structure (DRS), which has a rectangular relief profile, and the width of the protrusion is equal to the width of the depressions (shape of the type: «ideal meander»). The depth of the relief H_p is in the range from a quarter of the wavelength to several wavelengths of laser radiation. With a normal incidence of an optical beam with a wavelength λ on a DRS, after it is reflected from the relief structure, the phase front of the reflected wave gets spatial phase modulation with a phase difference depth equal to: $\Delta\Phi = (4\pi/\lambda) \cdot H_p$. When analysing the spatial spectrum of the wave, after its reflection from the DRS, we will use, instead of the depth of the phase difference, the quantity $\Phi_M = \Delta\Phi/2$ that we will call: «the amplitude of the spatial phase modulation of the wave front». With a normal incidence and reflection of the optical beam from the DRS, the magnitude



передачи в другой заданной области. К достоинствам фильтра данного типа можно отнести простоту его изготовления и возможность перестройки спектральной характеристики фильтра в широких пределах.

ВВЕДЕНИЕ

В основе работы представленных схем лежат дифракционные эффекты, наблюдаемые при отражении лазерного пучка от глубокой рельефной структуры (ГРС), которая имеет прямоугольный профиль рельефа, при этом ширина выступа равна ширине впадины рельефа (форма типа: «идеальный меандр»). Глубина рельефа H_p лежит в диапазоне от четверти длины волны до нескольких длин волн излучения лазера. При нормальном падении оптического пучка с длиной волны λ на ГРС после его отражения от рельефной структуры фазовый фронт отраженной волны получает пространственную фазовую модуляцию с глубиной перепада фаз, равной $\Delta\Phi = (4\pi/\lambda) \cdot H_p$. При анализе пространственного спектра волны после ее отражения от ГРС мы будем использовать вместо глубины перепада фаз величину $\Phi_M = \Delta\Phi/2$, которую мы будем называть «амплитуда пространственной фазовой модуляции волнового фронта». При нормальном падении и отражении оптического пучка от ГРС величина амплитуды пространственной фазовой модуляции равна $\Phi_M = (2\pi/\lambda) \cdot H_p$. Однако, если угол падения θ не равен нулю, то амплитуда пространственной фазовой модуляции **уменьшается** с увеличением угла падения по следующему закону:

$$\Phi_M = (2\pi/\lambda) \cdot H_p \cos\theta. \quad (1)$$

Специально отметим, что при наклонном падении оптического пучка на ГРС мы будем рассматривать только схему, в которой **плоскость падения – отражения оптического пучка строго параллельна линиям рельефа ГРС**. При этом отсутствуют эффекты затенения части углублений канавок ГРС, которые наблюдались бы при наклонном падении оптического пучка поперек штрихов. Для построения реальных устройств мы используем ГРС, период которых намного больше длины волны излучения: $\Lambda_p \gg \lambda$. При этих условиях анализ пространственного спектра после отражения оптической волны от ГРС с формой идеального меандра дает следующую формулу для расчета

of the amplitude of the spatial phase modulation is: $\Phi_M = (2\pi/\lambda) \cdot H_p$. However, if the angle of incidence θ is not zero, then the amplitude of the spatial phase modulation **decreases** with increasing angle of incidence according to the following law:

$$\Phi_M = (2\pi/\lambda) \cdot H_p \cos\theta. \quad (1)$$

We especially note that with an oblique incidence of the optical beam on the DRS, we will only consider a scheme in which the plane of incidence – **the reflection of the optical beam is strictly parallel to the lines of the relief of the DRS**. At the same time, there are no shadowing effects on the part of the grooves of the grooves of the DRS, which would be observed with an oblique incidence of the optical beam across the grooves. To build real devices, we use DRSs, the period of which is much longer than the radiation wavelength: $\Lambda_p \gg \lambda$. Under these conditions, the analysis of the spatial spectrum after the reflection of an optical wave from a DRS with the shape of an ideal meander gives the following formula for calculating the power of the zero diffraction order P_0 [1, 2, 6, 9]:

$$P_0 = P_{\text{эфф}} \left(0,5 + 0,5 \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} H_p \cdot \cos\theta \right) \right), \quad (2)$$

$P_{\text{эфф}} = P_{\text{in}} \cdot R$ is the effective radiation power, at the input, P_{in} is the power of the radiation incident on the DRS, R is the reflection coefficient of the radiation from the surface of the DRS.

Expression (2) is important for the subsequent analysis of the operation of the circuits, since in all the circuits under consideration we use only the radiation of the zero diffraction order. The first and higher orders of diffraction are not used in these schemes, therefore we will not consider them here. The dependences of the power of zero order on the angle of incidence of the optical beam on the DRS for two values of the depth of the DRS are shown in Fig. 1 (a, b).

It should be noted that the experimental studies conducted in [1] at DRS with different depths showed that the experimental and calculated dependences $P_0(\theta)$ coincide with very high accuracy.

On the dependences shown in Fig. 1 (a, b), the black dots mark the midpoints of the linear portions of the curves $P_0(\theta)$. One of the points on each of these curves corresponds to the angle of incidence $\theta = 45^\circ$, which is optimal if this DRS is used as part of a block new reflector.

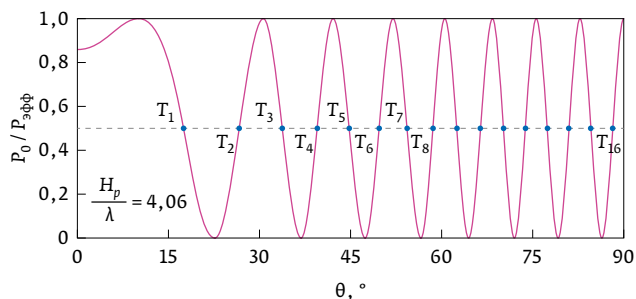
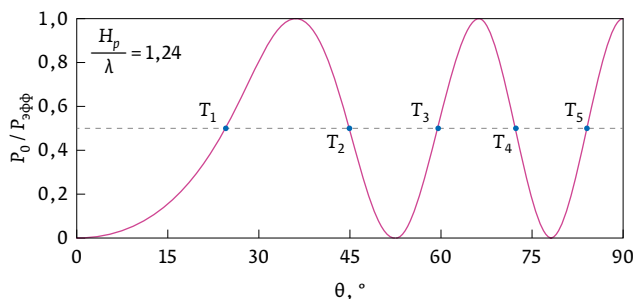


Рис 1. Расчетные зависимости мощности излучения в нулевом дифракционном порядке от угла падения лазерного пучка на ГРС для структур с различной глубиной: а) $H_p = 1,24 \lambda$; б) $H_p = 1,24 \lambda$
Fig 1. Calculated dependences of the radiation power in zero diffraction order on the angle of incidence of the laser beam on the DRS for structures with different depths: а) $H_p = 1,24 \lambda$; б) $H_p = 1,24 \lambda$

мощности P_0 нулевого порядка дифракции [1, 2, 6, 9]:

$$P_0 = P_{эфф} \left(0,5 + 0,5 \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} H_p \cdot \cos \theta \right) \right), \quad (2)$$

$P_{эфф} = P_{in} \cdot R$ – эффективная мощность излучения, на входе, P_{in} – мощность излучения, падающего на ГРС, R – коэффициент отражения излучения от поверхности ГРС.

Выражение (2) важно для последующего анализа работы схем, так как во всех рассматриваемых схемах мы используем излучение только нулевого порядка дифракции. Первые и высшие порядки дифракции в данных схемах не используются, поэтому здесь мы не будем их рассматривать. Зависимости мощности нулевого порядка от угла падения оптического пучка на ГРС для двух значений глубины ГРС приведены на рис. 1(а, б).

Следует заметить, что экспериментальные исследования, проведенные в [1] на ГРС с различными глубинами, показали, что экспериментальные и расчетные зависимости $P_0(\theta)$, совпадают с очень высокой точностью.

На зависимостях, приведенных на рис. 1(а, б), черными точками отмечены середины линейных участков кривых $P_0(\theta)$. Одна из точек на каждой из этих кривых соответствует углу падения $\theta = 45^\circ$, что оптимально в случае применения этой ГРС в составе блока уголкового отражателя.

Положим, что мы установили ГРС в исходное положение, при котором угол падения будет соответствовать одной из точек $T_1, T_2, T_3 \dots$. Если при этом ГРС будет отклоняться на небольшой угол в плоскости, параллельной линиям рельефа

Suppose we set the DRS to the initial position at which the angle of incidence corresponds to one of the points $T_1, T_2, T_3 \dots$. If at the same time the DRS will deviate by a small angle in the plane parallel to the lines of the DRS relief, then the increment of power of the zero diffraction order will be proportional to the increment of the deviation angle of the DRS, $\Delta\theta$, from the initial position:

$$\Delta P_0 = S_{\theta p} \cdot \Delta \theta. \quad (3)$$

Here $S_{\theta p}$ is the steepness of the linear transformation of the angle deviations to changes in the power of the zero diffraction order. Note that the linearity of the transformation is violated near areas in which the power reaches maximum and minimum values. In practical devices, described below, linear dependency areas are used for linear analogue modulation of laser radiation, as well as in the construction of small oscillation sensors. Next, we consider a number of devices based on the DRS.

LASER RADIATION MODULATOR

The modulator [4,6], has a mechanical drive. It can be used for static power control at the output of the circuit and for modulating the radiation power of a laser with low frequencies. The device can be designed to work in both visible and infrared wavelengths. A feature of the scheme is the use of the DRS in the corner reflector unit (CRU), which ensures the constant direction of the output reflected radiation beam with the angular deviation of the DRS.

The modulator circuit is shown in Fig. 1. The device contains a block of a corner reflector (1),

ГРС, то приращение мощности нулевого порядка дифракции будет пропорционально приращению угла отклонения ГРС, $\Delta\theta$ от начального положения:

$$\Delta P_0 = S_{0p} \cdot \Delta\theta. \quad (3)$$

Здесь S_{0p} – крутизна линейного преобразования отклонений угла в изменения мощности нулевого дифракционного порядка. Заметим, что линейность преобразования нарушается вблизи областей, в которых мощность достигает максимальных и минимальных значений. В практических устройствах, описанных ниже, линейные участки зависимостей используются для линейной аналоговой модуляции лазерного излучения, а также при построении датчиков малых колебаний. Далее рассмотрим ряд устройств на основе ГРС.

МОДУЛЯТОР ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Модулятор [4, 6] имеет механический привод. Он может применяться для статической регулировки мощности на выходе схемы и для модуляции мощности излучения лазера с низкими частотами. Устройство может быть сконструировано для работы как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне длин волн. Особенностью схемы является применение ГРС в составе блока уголкового отражателя (БУО), что обеспечивает неизменность направления выходного отраженного пучка излучения при угловом отклонении ГРС.

Схема модулятора изображена на рис 1. Устройство содержит блок уголкового отражателя (1), который расположен на пути пучка излучения, исходящего от лазера (2). На одной из плоскостей БУО установлена ГРС (3), которая имеет прямоугольный профиль в форме меандра

which is located on the path of the radiation beam emanating from the laser (2). On one of the BUO planes, a DRS (3) is installed, which has a rectangular profile in the form of a meander. The surface of the DRS has a high reflectivity. The DRS lines are located in the plane of incidence – the reflection of the laser beam. The depth of the relief of a DRS H_p , is usually several times greater than the wavelength λ of the modulated radiation. The characteristic of one of the DRS options is depicted in Figure 1 (b). On the second plane of the BCU, a mirror (4) with a high reflection coefficient is attached. The DRS planes and mirrors are located at a right angle and form an angular reflector, which returns a laser beam incident on it in the opposite direction. The CRU is connected with the axis of the electromechanical drive (5), which ensures its rotation at the given angles. The axis of rotation of the drive lies in the plane of the DRS and is perpendicular to the plane of incidence of the reflection of laser radiation. Provided that the axis of rotation passes through the centre of the region of incidence of the laser beam on the DRS, the optical beam from the laser will not move along the plane of the DRS when turning the CRU. The direction of the output radiation beam after reflection from the mirror (4) **does not change** when the CRU is rotated around the axis. After reflection from the CRU, the radiation decays into diffraction orders and then, after reflection from the auxiliary mirror (6), is directed to the diaphragm (7), which extracts only zero order from the diffraction pattern. Other orders, indicated by dotted lines in the figure, are cut off by an absorbing screen surrounding the aperture.

The mechanical drive with the CRU is installed on the coordinate table (8), which provides movement in two coordinates and rotation of the drive with the CRU and is intended to set the CRU at the



БАШНЯ ВЫТЯЖКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОЛОКОН

Башня вытяжки OFC 205F компании Некстром предназначена для производства кварцевых волокон, мягкого стекла, стержней и капилляров. Обладая технологиями производства PM, PCF, LMA, тонких волокон, нанесения различных покрытий мы предлагаем нашим заказчикам весь комплекс оборудования для производства волокон специального назначения.

Российское представительство компаний
Розендаль Машинен ГмбХ & Некстром ОЙ


www.rosendahlnextrom.com


111020 Москва, Россия, Ул. Старожевая 4, офис 203-206
Тел/факс: +7 499 271 3439
Моб: +7 915 751 6504
elena.romanova@rosendahlnextrom.com



дра. Поверхность ГРС имеет высокий коэффициент отражения. Линии ГРС расположены в плоскости падения – отражения лазерного пучка. Глубина рельефа ГРС, H_p обычно в несколько раз больше длины волны λ модулируемого излучения. Характеристика одного из вариантов ГРС изображена на рис. 1(б). На второй плоскости БУО закреплено зеркало (4) с высоким коэффициентом отражения. Плоскости ГРС и зеркала расположены под прямым углом и образуют уголкового отражателя, который возвращает падающий на него пучок излучения лазера в противоположном направлении. БУО связан с осью электромеханического привода (5), который обеспечивает его повороты на заданные углы. Ось вращения привода лежит в плоскости ГРС и перпендикулярна плоскости падения отражения лазерного излучения. При условии, что ось вращения проходит через центр области падения лазерного пучка на ГРС, оптический пучок от лазера не будет смещаться по плоскости ГРС при повороте БУО. Направление выходного пучка излучения после отражения от зеркала (4) **не изменяется** при повороте БУО вокруг оси. После отражения от БУО излучение распадается на дифракционные порядки и затем после отражения от вспомогательного зеркала (6) направляется на диафрагму (7), которая выделяет из дифракционной картины только нулевой порядок. Другие порядки, обозначенные на рисунке пунктирными линиями, отсекаются поглощающим экраном, окружающим диафрагму.

Механический привод с БУО установлен на координатном столике (8), который обеспечивает перемещение по двум координатам и поворот привода с БУО и предназначен для установки БУО в оптимальное положение по отношению к входному лазерному пучку. Модуляция мощности пучка излучения в нулевом порядке дифракции происходит в результате поворота БУО под действием привода. Для контроля мощности выходного пучка в ходе контрольных измерений на выходе был установлен фотодиод (9).

Рассмотрим некоторые характерные параметры модулятора. С одной стороны, период ГРС, Λ_p должен быть существенно меньше диаметра лазерного пучка D_n , что необходимо для хорошего углового разделения дифракционных порядков. Кроме того, для хорошего разделения дифракционных пучков на плоскости диафрагмы необходимо, чтобы расстояние L от БУО до диафрагмы удовлетворяло условию: $L \geq k D_n \cdot \Lambda_p / \lambda$, где k – коэффициент, равный при-

optimum position relative to the input laser beam. The modulation of the power of the radiation beam in the zero diffraction order occurs as a result of the rotation of the BCF under the action of a drive. To control the output beam power during the control measurements, a photodiode (9) was installed at the output.

Consider some of the characteristic parameters of the modulator. On the one hand, the period of the DRS, Λ_p , must be substantially smaller than the diameter of the laser beam D_n , which is necessary for a good angular separation of the diffraction orders. Moreover, for a good separation of diffraction beams on the plane of the diaphragm it is necessary that the distance L from the CRU to the diaphragm satisfies the condition: $L \geq k D_n \cdot \Lambda_p / \lambda$, where k is a coefficient equal to about 2-3. From this relationship it is clear that the dimensions of the device decrease with a decrease in the period of the DRS. However, the period of the DRS should be significantly longer than the wavelength of the laser radiation: $\Lambda_p \gg \lambda$. Taking into account these conditions, we used a DRS with a period of 100 μm for an experimental model of a modulator of a helium-neon laser beam. It should be noted that the amplitude characteristics of the modulator are determined by the depth of the DRS relief and do not depend on its period. A more detailed analysis of the choice of DRS parameters can be found in [6].

Here are some of the results of an experimental study of the modulator layout. The modulator layout was assembled in accordance with the scheme shown in Fig. 2. The relief structure was made using photolithography technology and chemical etching of the substrate from glass, followed by vacuum deposition of an opaque reflective aluminium film onto the surface of the relief. The depth of the relief of the DRS was determined by the method described in [2], it was $H_p = 2,48 \pm 0,025$ μm , and taking into account that the experiments were carried out with helium – by a neon laser, the ratio of depth to wavelength was: $H_p / \lambda = (3,92 \pm 0,04)$. This parameter value is close to the value that corresponds to the graph in fig. 1 (b). To observe the shape of the modulation of the optical beam power at the output, after the diaphragm (7), a photodiode FD-24K with a load resistor was installed. The signal at the photodiode load is proportional to the radiation power at the modulator output in the zero diffraction order. A harmonic signal was applied to the input of a mechanical drive. The output waveforms corresponding to the various input levels of the drive are shown in Fig. 3. As can be seen from

мерно 2-3. Из этого соотношения видно, что габариты устройства уменьшаются при уменьшении периода ГРС. Вместе с тем период ГРС должен быть значительно больше, чем длина волны излучения лазера: $\Lambda_p \gg \lambda$. С учетом этих условий для экспериментального макета модулятора пучка гелий-неонового лазера мы применяли ГРС с периодом 100 мкм. Следует заметить, что амплитудные характеристики модулятора определяются глубиной рельефа ГРС и не зависят от ее периода. Более детальный анализ выбора параметров ГРС можно найти в [6].

Приведем далее некоторые результаты экспериментального исследования макета модулятора. Макет модулятора был собран в соответствии со схемой, изображенной на рис. 2. Рельефная структура изготовлена с помощью технологии фотолитографии и химического травления подложки из стекла с последующим вакуумным напылением непрозрачной отражающей алюминиевой пленки на поверхность рельефа. Глубина рельефа ГРС была определена по методике, изложенной в [2], она составила $H_p = 2,48 \pm 0,025$ мкм, а с учетом того,

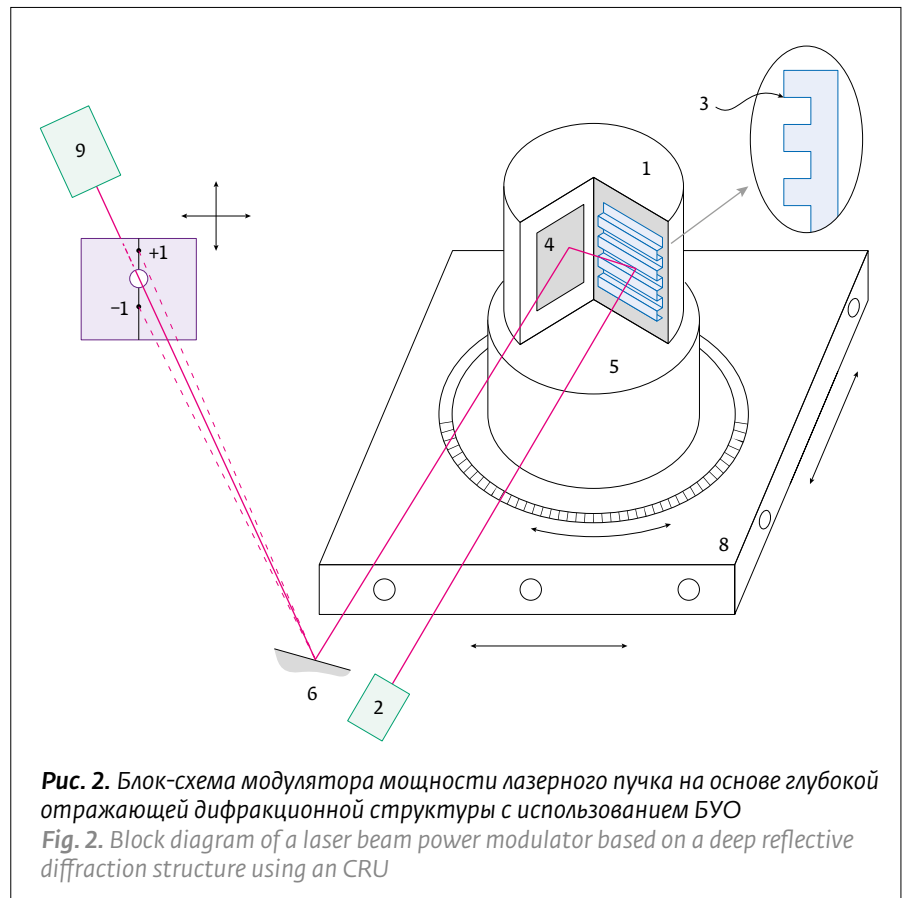


Рис. 2. Блок-схема модулятора мощности лазерного пучка на основе глубокой отражающей дифракционной структуры с использованием БУО

Fig. 2. Block diagram of a laser beam power modulator based on a deep reflective diffraction structure using an CRU

the graphs given, with moderate amplitudes of the input oscillations, the shape of the output signal almost repeats the shape of the input harmonic signal (curves 1, 2). With a modulation depth close to 100%, nonlinear distortions are observed (curves 3 and 4). Thus, in contrast to widely used slotted



Вакуумное оборудование для оптики и микроэлектроники



Проектирование и производство вакуумных напылительных установок «под ключ»



Програмное обеспечение и автоматизация

Изготовление технологических устройств



Izovac

Разработка и изготовление тонкопленочных изделий

Разработка технологий формирования тонких пленок

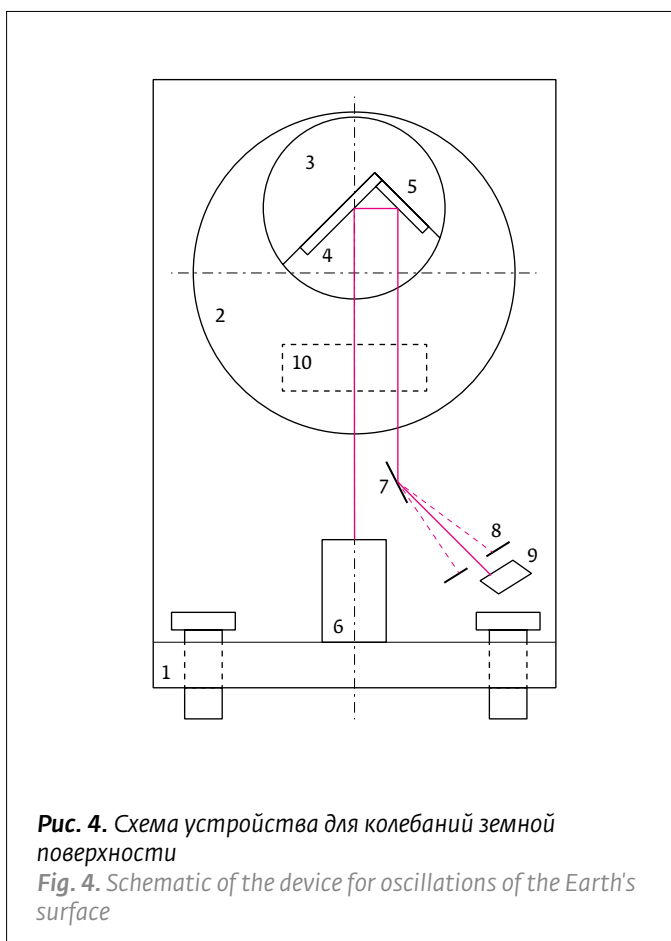
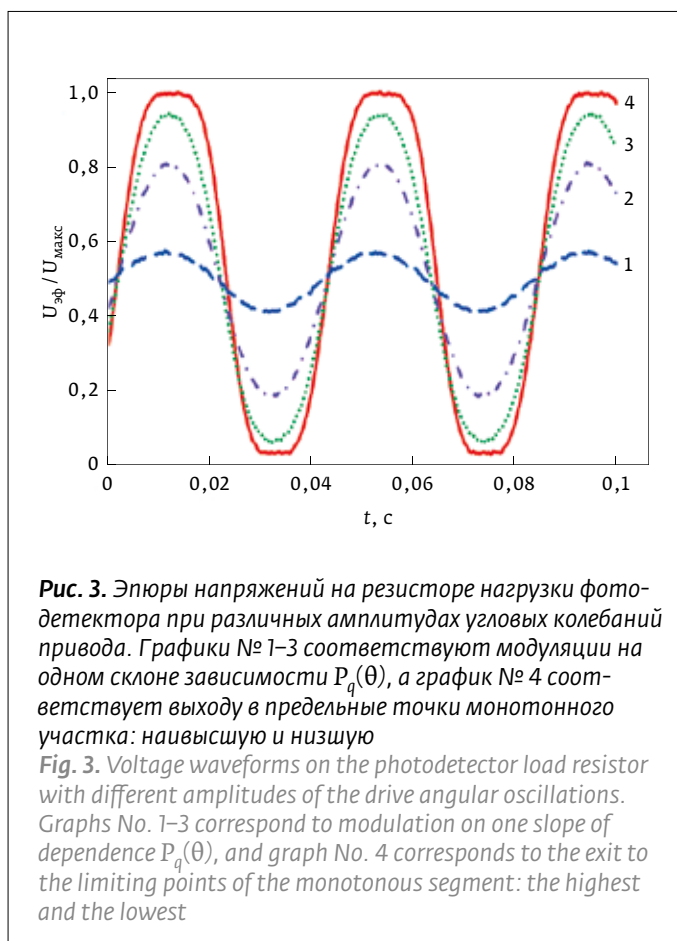
Оптические элементы

Напылительный сервис

Сложные и уникальные покрытия

ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907, 220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42, факс: +375 17 2931845

www.izovac.com
www.izovac-coatings.com



что эксперименты проводились с гелий – неоновым лазером, отношение глубины к длине волны составило $H_p/\lambda = (3,92 \pm 0,04)$. Эта величина параметра близка к величине, которая соответствует графику на рис. 1(б). Для наблюдения формы модуляции мощности оптического пучка на выходе после диафрагмы (7) был установлен фотодиод ФД-24К с резистором нагрузки. Сигнал на нагрузке фотодиода пропорционален мощности излучения на выходе модулятора в нулевом порядке дифракции. На вход механического привода подавался гармонический сигнал. Формы выходных сигналов, соответствующие различным уровням входного сигнала привода, представлены на рис. 3. Как видно из приведенных графиков, при умеренных амплитудах входных колебаний форма выходного сигнала практически повторяет форму входного гармонического сигнала (кривые 1, 2). При глубине модуляции, близкой к 100%, наблюдаются нелинейные искажения (кривые 3 и 4). Таким образом, в отличие от широко распространенных щелевых модуляторов с прерыванием оптического пучка данный тип модулятора позволяет получать гармони-

modulators with interrupted optical beam, this type of modulator makes it possible to obtain a harmonic modulation with a given modulation depth. In this case, the spatial structure of the output beam is not distorted by its interruption. A modulator can be designed for different wavelength ranges of laser radiation.

MEASUREMENT OF SMALL ANGULAR VIBRATIONS OF OBJECTS, APPLICATION OF THE ANGULAR SHIFT SENSOR TO BUILD A SEISMOMETER

As follows from the previous section, when the DRS oscillates, there is a transformation of the angular deviations of the DRS into changes in the radiation power of zero order diffraction. Essentially, the above scheme can serve as a sensor for small angular displacements. If you place the DRS on the oscillating object, then at the output of the photodetector installed in zero diffraction order, you can get a signal proportional to the angular deviation of the DRS. In this case, we make the DRS on a substrate – a thin plate or on a film, and glue this substrate to the surface of the object under study. Experi-

ческую форму модуляции с заданной глубиной модуляции. При этом пространственная структура выходного пучка не искажается его прерыванием. Модулятор может быть сконструирован для различных диапазонов длин волн лазерного излучения.

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБЪЕКТОВ, ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКА УГЛОВЫХ СМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СЕЙСМОМЕТРОВ

Как следует из предыдущего раздела, при колебаниях ГРС происходит преобразование угловых отклонений ГРС в изменения мощности излучения нулевого порядка дифракции. По существу рассмотренная выше схема может служить в качестве датчика малых угловых перемещений. Если разместить ГРС на колеблющемся объекте, то на выходе фотодетектора, установленного в нулевом дифракционном порядке, можно получить сигнал, пропорциональный угловому отклонению ГРС. В этом случае ГРС изготавливаем на подложке – тонкой пластинке или на пленке – и эту подложку приклеиваем к поверхности исследуемого объекта. Эксперименты по измерению угловых колебаний конструкций с применением ГРС были описаны в работе [1], при этом применялась простейшая схема без уголкового отражателя. Минимальная детектируемая амплитуда колебаний составила порядка $\Delta\theta=10^{-5}$ радиан при детектировании колебаний в полосе частот до 1 кГц.

Представляет интерес применение датчика угловых колебаний с применением БУО с ГРС в качестве датчика угловых колебаний в конструкции сейсмометра. Во многих известных конструкциях сейсмометров применяются датчики индуктивного типа, которые выдают выходной сигнал, пропорциональный скорости смещения земной поверхности. В области низких частот чувствительность таких датчиков падает. Индуктивные датчики не могут регистрировать статических изменений наклона поверхности. Применение оптоэлектронного датчика, построенного с использованием БУО с ГРС, позволяет расширить частотный диапазон измерений в сторону низких частот. При этом возможно измерение не только динамических, но и статических наклонов.

Упрощенная схема прибора для измерений колебаний земли изображена на рис. 4.

На основании прибора (1) в пружинных подвесах или в подшипниках установлена ось вращения,

ments on the measurement of angular oscillations of structures using DRS were described in [1], and the simplest scheme was used without an angular reflector. The minimum detected amplitude of oscillations was of the order of $\Delta\theta=10^{-5}$ radians when detecting oscillations in the frequency band up to 1 kHz.

It is of interest to use an angular oscillation sensor with the use of a CRU with DRS as an angular oscillation sensor in a seismometer design. In many well-known seismometer designs, inductive type sensors are used that produce an output signal proportional to the earth surface displacement velocity. In the low frequency range, the sensitivity of such sensors decreases. Inductive sensors cannot detect static changes in surface inclination. The use of an optoelectronic sensor built with the use of a CRU with DRS allows you to extend the frequency range of measurements in the direction of low frequencies. In this case, it is possible to measure not only dynamic, but also static slopes.

A simplified diagram of an instrument for measuring earth oscillations is shown in Fig. 4. On the basis of the device (1), an axis of rotation is mounted in elastic suspensions, or in bearings, on which a physical pendulum (2) is fixed, which is disk-shaped in this drawing. The centre of gravity of the physical pendulum is located below the axis of rotation at some distance: R_{OC} . In the area of the axis of rotation, with the help of a sleeve, the CRU (3) is attached to the disk, the two faces of which are at right angles to each other. On one side of the corner reflector is a reflecting DRS with a rectangular profile (4), and on the other side there is a mirror (5). The DRS is fixed on the edge of the CRU in such a way that the relief lines are perpendicular to the axis of rotation of the physical pendulum and are actually parallel to the disk plane. A semiconductor laser (6) is installed on a horizontal platform of the base (1) so that its radiation beam is directed to the DRS. A rotating mirror (7) was installed in the path of the laser beam returned after reflecting it from the DRS (4) and then from the mirror (5), by means of which the diffraction beam of radiation is directed to the aperture (8), which emits zero-order radiation diffraction. The isolated zero-order radiation beam is directed to the photodetector (9), with the output signal obtained from its output. Permanent magnets (10) are fixed on the vertical rack of the base (1), with its flat surfaces located parallel to the surface of the metal disk (2) near its surface. The magnets are designed for optimal damping of disk oscillations

на которой закреплен физический маятник (2), который на данном чертеже имеет форму диска. Центр тяжести физического маятника расположен ниже оси вращения на некотором расстоянии R_{OC} . В области оси вращения с помощью втулки к диску прикреплен БУО (3), две грани которого расположены под прямым углом друг к другу. На одной грани углового отражателя расположена отражающая ГРС с прямоугольным профилем (4), а на другой грани расположено зеркало (5). ГРС закреплена на грани БУО таким образом, чтобы линии рельефа были перпендикулярны оси вращения физического маятника и фактически параллельны плоскости диска. Полупроводниковый лазер (6) установлен на горизонтальной площадке основания (1) таким образом, чтобы пучок его излучения был направлен на ГРС. На пути лазерного пучка, возвращенного после отражения его от ГРС (4) и затем от зеркала (5), установлено поворотное зеркало (7), с помощью которого дифракционный пучок излучения направлен на диафрагму (8), выделяющую излучение нулевого порядка дифракции. Выделенный пучок излучения нулевого порядка направляется на фотодетектор (9), с выхода которого получают электрический выходной сигнал. На вертикальной стойке основания (1) закреплены постоянные магниты (10), плоские поверхности которых расположены параллельно поверхности металлического диска (2) вблизи его поверхности. Магниты предназначены для оптимального демпфирования колебаний диска за счет эффекта возникновения вихревых токов в металлическом диске при его движении.

БУО (3) имеет возможность поворота относительно диска, что необходимо для первоначальной настройки, т. е. для обеспечения установки начального оптимального угла падения лазерного пучка на ГРС (4). На горизонтальной части основания (1) расположены три регулировочных винта, которые предназначены для

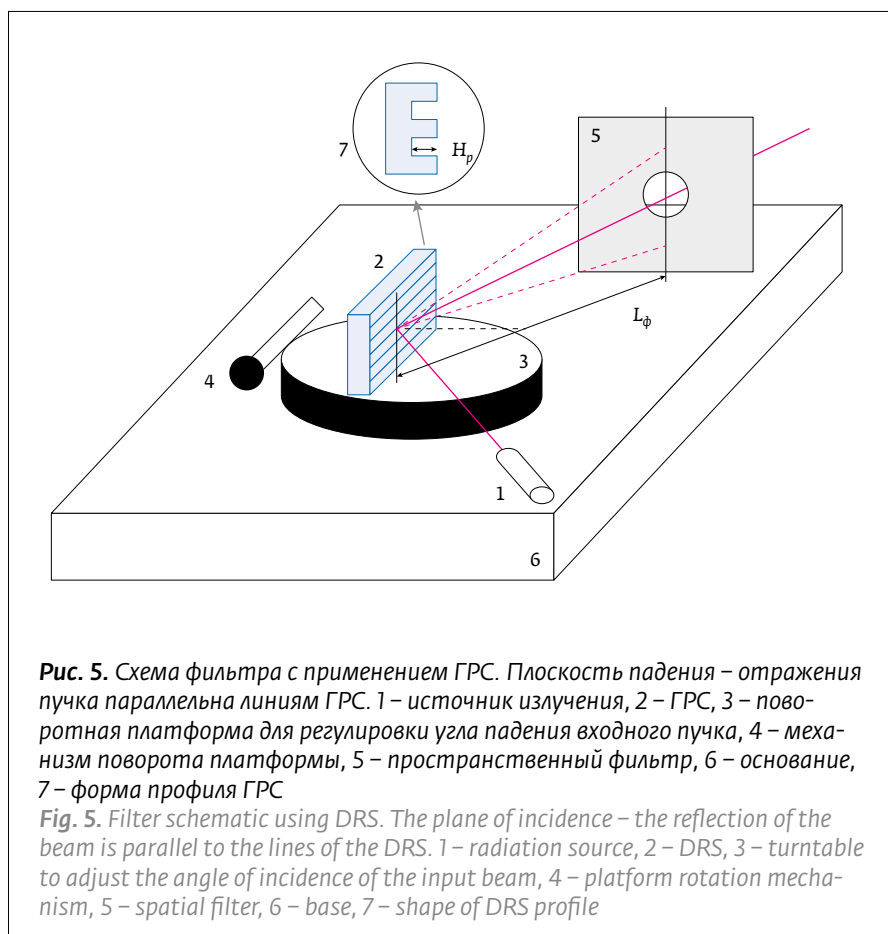


Рис. 5. Схема фильтра с применением ГРС. Плоскость падения – отражения пучка параллельна линиям ГРС. 1 – источник излучения, 2 – ГРС, 3 – поворотная платформа для регулировки угла падения входного пучка, 4 – механизм поворота платформы, 5 – пространственный фильтр, 6 – основание, 7 – форма профиля ГРС

Fig. 5. Filter schematic using DRS. The plane of incidence – the reflection of the beam is parallel to the lines of the DRS. 1 – radiation source, 2 – DRS, 3 – turntable to adjust the angle of incidence of the input beam, 4 – platform rotation mechanism, 5 – spatial filter, 6 – base, 7 – shape of DRS profile

due to the effect of eddy currents in a metal disk when it moves.

CRU (3) has the ability to rotate relative to the disk, which is necessary for the initial setup, i. e. to ensure the installation of the initial optimal angle of incidence of the laser beam on the DRS (4). On the horizontal part of the base (1) there are three adjustment screws, which are designed to set the base to its original horizontal position. In this case, two screws are placed on one side of the base on a line perpendicular to the plane of the disk, and the third screw is placed on the opposite side of the base. With the help of the third adjustment screw it is possible to fine-tune the base inclination in the disk plane and set the optimum angle of incidence of the laser beam on the DRS

When the base of the device is horizontally moved, the physical pendulum rotates relative to the base in the direction opposite to the base movement due to inertia forces along with the surface on which it is installed. As a result, a change occurs in the angle of incidence of the laser beam on the DRS in a plane parallel to its lines, which causes a change in the power of the zero diffraction order,



установки основания в исходное горизонтальное положение. При этом два винта размещены на одной стороне основания на линии, перпендикулярной плоскости диска, а третий винт размещен на противоположной стороне основания. С помощью третьего регулировочного винта возможна тонкая подстройка наклона основания в плоскости диска и установка оптимального угла падения пучка лазера на ГРС

При горизонтальном движении основания устройства вместе с поверхностью, на которой оно установлено, за счет сил инерции происходит поворот физического маятника относительно основания в направлении, противоположном движению основания. В результате происходит изменение угла падения лазерного пучка на ГРС в плоскости, параллельной ее линиям, что вызывает изменение мощности нулевого порядка дифракции, пропорциональное углу отклонения физического маятника. Электрический сигнал с выхода фотодиода содержит две компоненты. Одна компонента сигнала пропорциональна наклону поверхности, на которой установлен прибор. При этом на выходе регистрируется как переменная, так и постоянная составляющая наклона поверхности. Вторая компонента выходного сигнала пропорциональна горизонтальному смещению поверхности, на которой установлен прибор. При этом устройство не реагирует на статические перемещения в горизонтальном направлении, а реагирует только на колебания в горизонтальном направлении, параллельном плоскости физического маятника. Уровень выходного сигнала этой компоненты будет снижаться в области частот колебаний, меньших резонансной частоты физического маятника, однако это снижение не будет таким быстрым, как у приборов с индуктивным датчиком колебаний.

which is proportional to the deflection angle of the physical pendulum. The electrical signal from the photodiode output contains two components. One component of the signal is proportional to the slope of the surface on which the instrument is mounted. In this case, both the variable and the constant component of the surface slope are recorded at the output. The second component of the output signal is proportional to the horizontal displacement of the surface on which the device is installed. In this case, the device does not respond to static displacements in the horizontal direction, but responds only to oscillations in the horizontal direction parallel to the plane of the physical pendulum. The output level of this component will decrease in the region of oscillation frequencies lower than the resonant frequency of the physical pendulum; however, this decrease will not be as rapid as with instruments with an inductive oscillation sensor.

OPTICAL SIGNAL FILTERS BUILT USING DRS

As can be seen from the expression (2) the power transfer ratio from the input to the output of the device, in which diffraction is applied to the DRS, depends on the radiation wavelength. This relationship can be used to filter optical radiation. The simplest filter scheme using the DRS is shown in Fig. 5. Along with this scheme it is possible to apply a more complex scheme containing an angled reflector.

Calculated parameters of filters. First, we consider the simplest filter that suppresses radiation at certain wavelengths. The dependence of the transmission power of the radiation power $k_p = P_o / P_{эфф}$ on the radiation wavelength, λ , is determined by the relation (2). Fig. 6 shows a family of calculated dependencies $k_p(\lambda)$ for different values of the parameter θ the angle of incidence of the light

OXARA

оптические стекла заготовки и прессовки до 1м коэффициенты преломления от 1,4 до 2,2	фториды BaF ₂ , CaF ₂ , LiF, MgF ₂ , (УФ, В, ИК)	алмазный инструмент алмазные таблетки (на полимере, на металле) алмазные сверла (размеры и формы под заказ)
ИК стекла и кристаллы Германий (Ge), Кремний (Si), Селенид Цинка (ZnSe), Сульфид Цинка (ZnS)	кристаллический кварц синтетический кристаллический кварц	лаки защитные, блокировочные, чернения водостойкие и водорастворимые
кварцевые стекла КУ, КВ, КИ блоки и заготовки до 1,5м	полировочные суспензии на основе CeO ₂ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , алмаза наносуспензии для финишной полировки	пленкообразующие материалы оксиды, фториды, сульфиды, селениды, металлы и т. д.
стеклокерамика КТЛР 0,0+/-1,0x10 ⁻⁷ /°C блоки и заготовки до 1,5м	смолы полирующие и блокировочные твердость от 15°С до 58°С	очистка оптики чистящие материалы, оборудование для регенерации ультразвуковые системы очистки
полировочные пленки полиуретан, кашемир, кожа		

OXARA GmbH, Hans-Knoell-Str. 6, 07745 Jena, Germany, www.oxara.com, glass@oxara.com, тел. в Москве: +7 905 729 33 79, тел. в Минске: +375 29 647 93 48, тел. в Германии: +49 3641 35 45 58

ФИЛЬТРЫ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ПОСТРОЕННЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРС

Как видно из выражения (2), коэффициент передачи мощности с входа на выход устройства, в котором применяется дифракция на ГРС, зависит от длины волны излучения. Эту зависимость можно использовать для фильтрации оптического излучения. Простейшая схема фильтра с использованием ГРС приведена на рис. 5. Наряду с этой схемой можно применять более сложную схему, содержащую уголкового отражателя.

Расчетные параметры фильтров. Вначале рассмотрим наиболее простой фильтр, который подавляет излучение на определенных длинах волн. Зависимость коэффициента передачи мощности излучения $k_p = P_0 / P_{эфф}$ от длины волны излучения λ определяется соотношением (2). На рис. 6 приведено семейство расчетных зависимостей $k_p(\lambda)$ при различных значениях параметра θ – угла падения светового пучка на рельефную структуру с глубиной, равной: $H_p = 0,6$ мкм. На графиках имеются выраженные области низкого и области высокого коэффициента передачи мощности излучения с входа на выход фильтра. Этот график демонстрирует возможность перестройки расположения частот максимумов и минимумов коэффициентов пропускания фильтров за счет изменения угла падения входного оптического пучка. При различных углах падения **нулевые** (минимальные) значения коэффициента передачи фильтра соответствуют разным длинам волн, координаты которых на оси длин волн можно рассчитать по формуле:

$$\lambda_{\min}^{(n)} = \frac{4H_p}{2n+1} \cos\theta, \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

При увеличении отношения H_p/λ частота расположения минимумов и максимумов зависимости $k_p(\lambda)$ на шкале длин волн увеличивается. Подобрать определенным образом глубину ГРС и угол падения оптического пучка, мы можем выделять или подавлять определенные спектральные линии.

Рассмотрим в качестве примера такую задачу: выделить излучение спектральной линии аргонового лазера, которая имеет длину волны $\lambda_2 = 0,514$ мкм, и при этом подавить излучение другой сильной спектральной линии с длиной волны $\lambda_1 = 0,488$ мкм. Для этого коэффициент передачи фильтра должен быть максимальным на длине волны 0,514 мкм, а на длине волны $\lambda_1 = 0,488$ он должен быть минимальным.

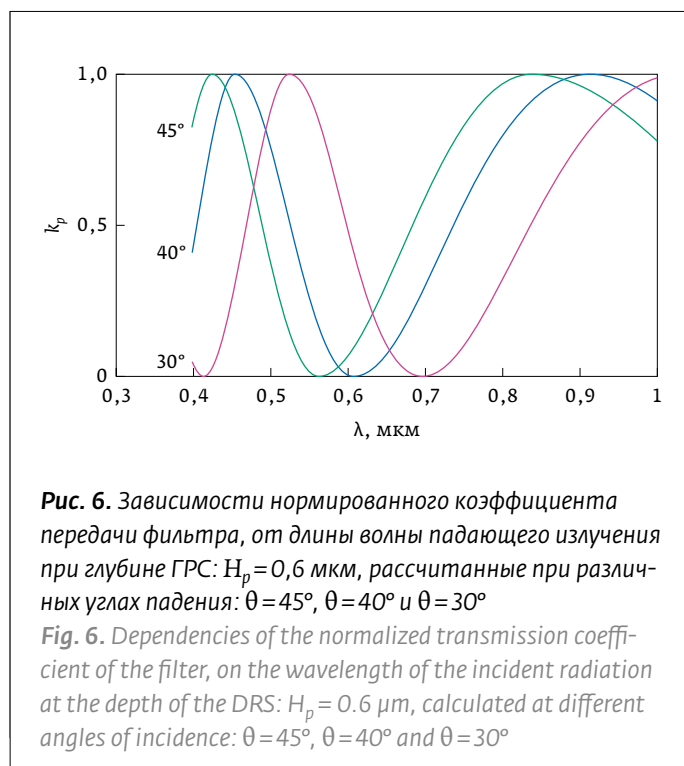


Рис. 6. Зависимости нормированного коэффициента передачи фильтра, от длины волны падающего излучения при глубине ГРС: $H_p = 0,6$ мкм, рассчитанные при различных углах падения: $\theta = 45^\circ$, $\theta = 40^\circ$ и $\theta = 30^\circ$

Fig. 6. Dependencies of the normalized transmission coefficient of the filter, on the wavelength of the incident radiation at the depth of the DRS: $H_p = 0.6 \mu\text{m}$, calculated at different angles of incidence: $\theta = 45^\circ$, $\theta = 40^\circ$ and $\theta = 30^\circ$

beam on the relief structure with a depth equal to: $H_p = 0.6 \mu\text{m}$. On the graphs there are marked areas of low and areas of high transmit power of radiation from the input to the output of the filter. This graph demonstrates the possibility of restructuring the frequencies of the maxima and minima of the transmittance of filters by changing the angle of incidence of the input optical beam. At different angles of incidence, **zero-out** (minimum) values of the filter transmission coefficient correspond to different wavelengths, whose coordinates on the axis of the wavelengths can be calculated by the formula:

$$\lambda_{\min}^{(n)} = \frac{4H_p}{2n+1} \cos\theta, \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

As the ratio H_p/λ increases, the frequency of the location of the minima and maxima of the dependence $k_p(\lambda)$ on the wavelength scale increases. Selecting in a certain way the depth of the DRS and the angle of incidence of the optical beam, we can select or suppress certain spectral lines.

Let's consider as an example the following problem: select the radiation of the spectral line of an argon laser, which has a wavelength: $\lambda_2 = 0.514 \mu\text{m}$ and at the same time suppress the radiation of another strong spectral line with a wavelength: $\lambda_1 = 0.488 \mu\text{m}$. For this, the filter transfer coeffi-

В результате расчетов, изложенных подробно в [7], мы выбрали глубину ГРС $H_p = 3$ мкм. Графики зависимостей коэффициентов передачи от длины волны представлены на рис. 7 (а, б). Как видно из графика № 1, приведенного на рис. 7(а), фильтр с параметрами ГРС $H_p = 3$ мкм, $\theta = 31,35^\circ$ подавляет излучение с длиной волны $\lambda_1 = 0,488$ мкм и пропускает излучение с длиной волны, равной $\lambda_2 = 0,514$ мкм.

Если же перестроить фильтр, изменив угол падения и установив его равным: $\theta = 35,53^\circ$, то при той же глубине ГРС, равной $H_p = 3$ мкм, фильтр будет пропускать излучение с длиной волны, равной $\lambda_1 = 0,488$ мкм и подавлять излучение с длиной волны $\lambda_2 = 0,514$ мкм, как это видно на графике № 3 на рис. 7.(б). Кривая № 2 на рис. 7 (а) показывает, как изменится характеристика фильтра в том случае, если ГРС будет изготовлена с погрешностью и ее глубина составит $H_p = 3,2$ мкм вместо глубины $H_p = 3$ мкм, при условии, что угол падения пучка остался равным $31,35^\circ$. Положения минимумов и максимумов существенно изменятся по сравнению с кривой № 1.

Однако неточность изготовления легко скомпенсировать за счет изменения угла падения. Для этого следует изменить первоначальный угол падения входного оптического пучка с угла $\theta = 31,35^\circ$ на другой угол падения $\theta = 36,81^\circ$. В результате после изменения угла падения входного пучка мы получаем расчетную кривую зависимости коэффициента передачи от длины волны, которая фактически с высокой точностью повторяет кривую № 1 на рис. 7(а). Таким образом при другой глубине ГРС, равной $H_p = 3,2$ мкм, можно легко скомпенсировать изменение спектральной характеристики фильтра. После перестройки схемы и установки нового угла падения $\theta = 36,81^\circ$, расчетная зависимость коэффициента передачи от длины волны смещается по оси длин волн, и она практически полностью совпадает с зависимостью, рассчитанной при сочетании параметров: $\theta = 31,35$ и $H_p = 3$ мкм. На практике точную настройку угла падения надо будет проводить по минимуму выходного излучения с заданной длиной волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показана возможность построения трех типов новых устройств, в основе работы которых лежит принцип дифракции оптического пучка на глубокой рельефной структуре. Применение датчиков с ГРС в сейсмометрах, возможно, позволит расши-

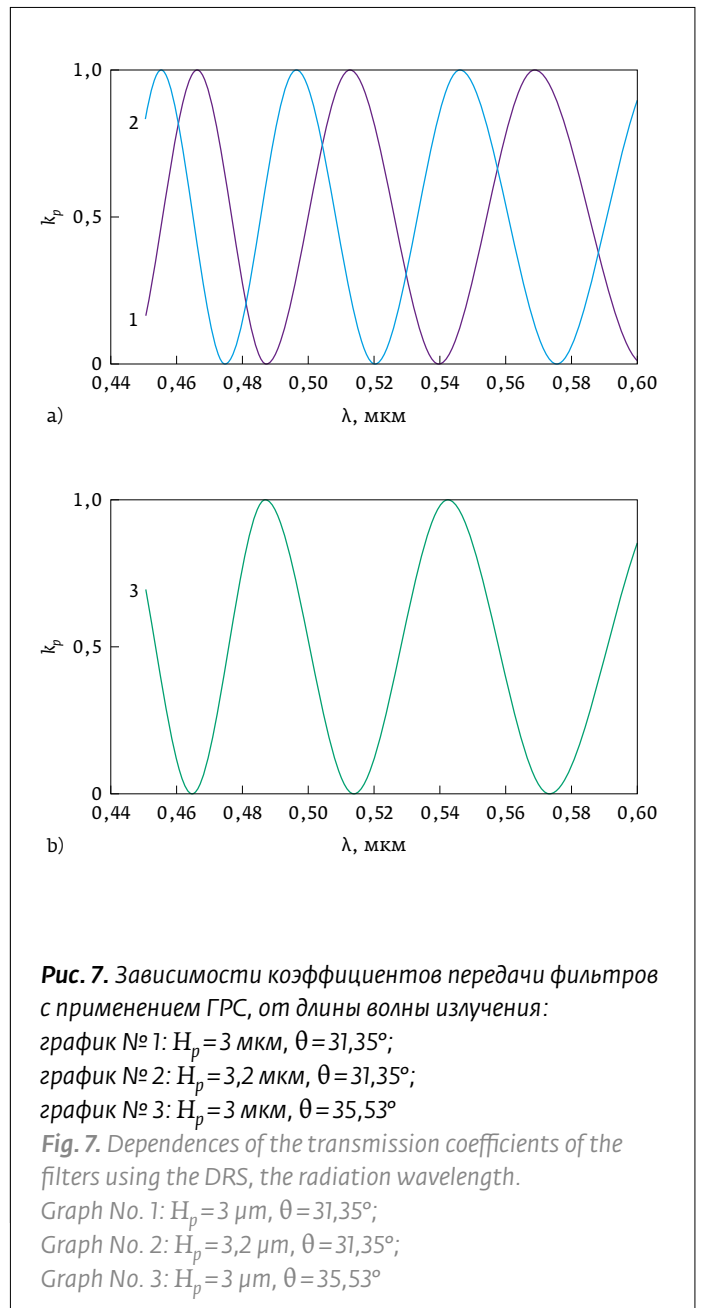


Рис. 7. Зависимости коэффициентов передачи фильтров с применением ГРС, от длины волны излучения:

график № 1: $H_p = 3$ мкм, $\theta = 31,35^\circ$;

график № 2: $H_p = 3,2$ мкм, $\theta = 31,35^\circ$;

график № 3: $H_p = 3$ мкм, $\theta = 35,53^\circ$

Fig. 7. Dependences of the transmission coefficients of the filters using the DRS, the radiation wavelength.

Graph No. 1: $H_p = 3 \mu\text{m}$, $\theta = 31,35^\circ$;

Graph No. 2: $H_p = 3,2 \mu\text{m}$, $\theta = 31,35^\circ$;

Graph No. 3: $H_p = 3 \mu\text{m}$, $\theta = 35,53^\circ$

cient must be maximum at the wavelength of $0.514 \mu\text{m}$, and at the wavelength of $0.488 \mu\text{m}$ it must be minimum.

As a result of the calculations described in detail in [7], we chose the depth of the DRS $H_p = 3 \mu\text{m}$. Graphs of the dependences of the transmission coefficients on the wavelength are shown in Fig. 7 (a, b). As can be seen from graph No. 1, shown in Fig. 7 (a), a filter with parameters: $H_p = 3 \mu\text{m}$, $\theta = 31,35^\circ$ suppresses radiation with a wavelength of $\lambda_1 = 0.488 \mu\text{m}$ and passes radiation with a wavelength equal to $\lambda_2 = 0.514 \mu\text{m}$.



рить частотный диапазон регистрации в сторону низких частот. Новые схемы фильтров на основе ГРС могут быть применены не только в видимом диапазоне длин волн, но и в различных областях инфракрасного диапазона. Для ИК диапазона ГРС могут быть изготовлены на поверхностях металлических пластин с высоким отражением.

Данные исследования были выполнены в лаборатории оптоэлектроники Института физических исследований и технологий Факультета физико-математических и естественных наук РУДН при поддержке программы 5-100.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Комоцкий В. А., Соколов Ю. М., Алексеев А. Н., Басистый Е. В.** Исследование оптоэлектронного датчика угловых смещений на основе глубокой отражательной фазовой дифракционной решетки. *Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика.* 2009; 4: 95–104.
Komockij V. A., Sokolov YU. M., Alekseev A. N., Basistyj E. V. Issledovanie optoelektronnogo datchika uglovyyh smeshchenij na osnove glubokoj otrazhatel'noj fazovoj difrakcionnoj reshetki. *Vestnik RUDN. Seriya Matematika. Informatika. Fizika.* 2009; 4: 95–104.
2. **Комоцкий В. А., Соколов Ю. М., Басистый Е. В.** Метод измерения глубины периодических рельефных отражателей акустических волн лазерным зондированием. *Радиотехника и электроника.* 2011; 56 (2): 243–248.
V. A. Komotskii, Yu. M. Sokolov, and E. V. Basistyj. Depth Measurement of the Periodic Grooved Reflectors of Surface Acoustic Waves Using Laser Probing. *Journal of Communications Technology and Electronics.* 2011; 56(2): 220–225.
3. **Комоцкий В. А., Корольков В. И., Соколов Ю. М.** Оптоэлектронные дифракционные датчики малых угловых перемещений. *Фотоника.* 2011; 1:16–19.
Komockij V. A., Korol'kov V. I., Sokolov YU. M. Optoelektronnye difrakcionnye datchiki malyyh uglovyyh peremeschenij. *Fotonika.* 2011; 1:16–19.
4. Патент RU 2616935/ Устройство для модуляции лазерного излучения. **Комоцкий В. А., Соколов Ю. М., Суетин Н. В.** 2017.
Patent RU 2616935/ Ustrojstvo dlya moduljatsii lazernogo izlucheniya. Komockij V. A., Sokolov YU. M. Suetin N. V. 2017.
5. Патент RU 181381/ Устройство для фильтрации спектров оптических сигналов. **Комоцкий В. А., Соколов Ю. М., Суетин Н. В.**; 2018.
Patent RU 181381/ Ustrojstvo dlya filtratsii spektrov opticheskikh signalov. Komockij V. A., Sokolov YU. M., Suetin N. V.; 2018.
6. **Комоцкий В. А., Соколов Ю. М., Суетин Н. В.** Модуляция лазерного пучка с применением углового отражателя и глубокой дифракционной решетки // *Радиотехника и электроника*, 2017, том 62, № 7, с. 717–722.
V. A. Komotskii, Yu. M. Sokolov, and N. V. Suetin. Laser Beam Modulation Using Corner Reflector and Deep Diffraction Grating. *Journal of Communications Technology and Electronics.* 2017; 62(7): 822–826.
7. **Комоцкий В. А., Соколов Ю. М., Суетин Н. В.** Оптический фильтр, построенный с применением глубокой периодической отражающей рельефной структуры. *НОЛОЕХРО 2018. 15 международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям. Тезисы докладов.* 2018; 165–169.
Komockij V. A., Sokolov YU. M. Suetin N. V. Opticheskij fil'tr, postroennyj s primeneniem glubokoj periodicheskoj otrazhayushchej rel'efnoj struktury. *НОЛОЕХРО 2018. 15 mezhduнародnaya konferenciya po golografiyi i prikladnym opticheskim tekhnologiyam. Tезisy dokladov.* 2018; 165–169.
8. **Комоцкий В. А.** Основы когерентной оптики и голографии. Конспект лекций. М.: Изд. РУДН. 2011.
Komockij V. A. *Osnovy kogerentnoj optiki i golografiyi. Konspekt lekcij.* М.: Izd. RUDN. 2011.
9. **Кашченко Н. М., Комоцкий В. А.** Определение глубины опорных дифракционных решеток на основе измерения и анализа дифракционных порядков. *Вестник РУДН. Серия физика.* 1999; 7(1): 55–65.
Kashchenko N. M., Komockij V. A. *Opređenje glubiny opornyh difrakcionnyh reshetok na osnove izmereniya i analiza difrakcionnyh poryadkov.* *Vestnik RUDN. Seriya fizika.* 1999; 7(1): 55–65.

If you rebuild if the filter changes the angle of incidence and sets it equal to: $\theta=35.53^\circ$ then for the same depth of the DRS, $H_p=3\ \mu\text{m}$, the filter will transmit radiation with a wavelength equal to $\lambda_1=0.488\ \mu\text{m}$ and suppress radiation with a wavelength of $\lambda_2=0.514\ \mu\text{m}$, as can be seen in graph No. 3 in Fig. 7. (b).

Curve number 2 in Fig. 7 (a) shows how the filter characteristic changes if the DRS is manufactured with an error and its depth is $H_p=3.2\ \mu\text{m}$ instead of depth $H_p=3\ \mu\text{m}$, provided that the angle of incidence of the beam remains 31.35° . The positions of the minima and maxima will change significantly as compared with curve 1.

However, the inaccuracy of manufacturing is easy to compensate by changing the angle of incidence. To do this, change the initial angle of incidence of the input optical beam from the angle $\theta=31.35^\circ$ to another angle of incidence $\theta=36.81^\circ$. As a result, after changing the angle of incidence of the input beam, we obtain the calculated curve of the transfer coefficient as a function of wavelength, which in fact repeats curve No. 1 in Fig. 7 (a) with high accuracy. Thus, with a different depth of the DRS equal to $H_p=3.2\ \mu\text{m}$, you can easily compensate for the change in the spectral characteristics of the filter. After restructuring the circuit and installing a new angle of incidence $\theta=36.81^\circ$, the calculated dependence of the transmission coefficient on the wavelength is shifted along the wavelength axis, and it almost completely coincides with the dependence calculated by combining the parameters: $\theta=31.35$ and $H_p=3\ \mu\text{m}$. In practice, it will be necessary to fine tune the angle of incidence to minimize the output radiation with a given wavelength.

CONCLUSION

As a result of the research, the possibility of constructing three types of new devices, based on the principle of diffraction of an optical beam on a deep relief structure, is shown. The use of sensors with DRS in seismometers may possibly expand the frequency range of recording in the direction of low frequencies. New filter schemes based on the DRS can be applied not only in the visible wavelength range, but also in different regions of the infrared range. For the IR range of the DRS can be made on the surfaces of metal plates with high reflection.

These studies were carried out in the Laboratory of Optoelectronics of the Institute of Physical Research and Technology of the Faculty of Physical, Mathematical and Natural Sciences of the RUDN University with the support of program 5-100.

21–24.10.2019

ТЕХНОФОРУМ



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



www.technoforum-expo.ru

Организаторы:



Российская Ассоциация
производителей
станкоинструментальной продукции
«Станкоинструмент»

При поддержке
Министерства промышленности
и торговли РФ

Под патронатом ТПП РФ

Международная
специализированная
выставка «Оборудование
и технологии обработки
конструкционных
материалов»



Реклама 12+



Россия, Москва,
ЦВК «Экспоцентр»