

Радиофизика

УДК 535.42:681.786.23

Исследование оптоэлектронного датчика угловых смещений на основе глубокой отражательной фазовой дифракционной решётки

**В. А. Комоцкий, Ю. М. Соколов, А. Н. Алексеев,
Е. В. Басистый**

*Кафедра радиофизики
Российский университет дружбы народов
Россия, 117198, Москва, ул. Миклуто-Маклая, 6*

Предложен и исследован оптоэлектронный датчик малых угловых перемещений на основе дифракции лазерного пучка на глубокой отражательной фазовой дифракционной решётке. Проведён теоретический анализ и экспериментальные исследования характеристик датчика.

Ключевые слова: оптоэлектронный датчик, датчик перемещений, малые угловые перемещения, фазовая дифракционная решётка.

1. Введение

В ряде предыдущих работ [1–3] были исследованы датчики, принцип работы которых основан на двойной дифракции света на периодических фазовых дифракционных решётках с прямоугольным профилем. При линейном смещении одной решётки относительно другой решётки в этих схемах величина интенсивности первого дифракционного порядка изменялась по гармоническому закону. Период этой зависимости равен периоду решётки Λ . Её линейный участок использовался для преобразования величины смещения одной из решёток в величину напряжения сигнала на выходе фотодетектора, помещённого в один из первых дифракционных порядков. В различных вариантах схем датчиков угловых смещений применялись блоки-сенсоры, составленные из двух жёстко связанных решёток [1], либо из решётки и зеркала [2]. Крутизна преобразования величины углового смещения в величину выходного сигнала в этих схемах пропорциональна толщине блока-сенсора. Поэтому массу блока-сенсора не удаётся сделать очень малой, и в случае измерений колебаний объектов, имеющих небольшую массу, прикрепление такого блока-сенсора к исследуемой конструкции может привести к недопустимым погрешностям измерений. Здесь мы рассматриваем новый оптоэлектронный датчик угловых перемещений, масса блока-сенсора которого во много раз меньше, чем у вышеупомянутого аналога. Принцип его работы иной, он основан на использовании зависимости интенсивности излучения нулевого дифракционного порядка от угла падения зондирующего лазерного пучка на периодическую отражающую рельефную фазовую дифракционную решётку [4].

2. Устройство и физический принцип работы измерителя

Предлагаемое устройство (рис.1) включает в себя лазер (1), блок-сенсор (2), который представляет собой фазовую рельефную дифракционную решётку (3), покрытую отражающей плёнкой (4), пространственный фильтр (5), фотодетектор (6) и резистор нагрузки фотодетектора (7).

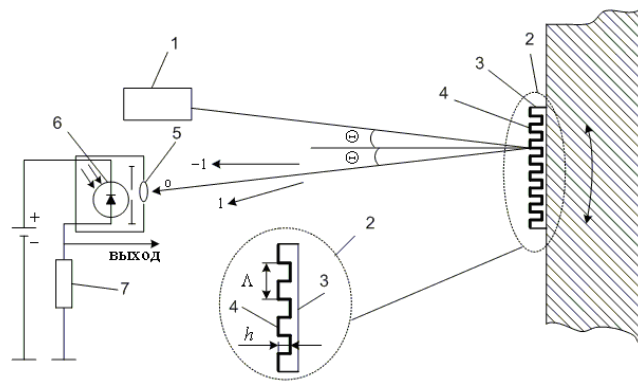


Рис. 1. Схема оптоэлектронного датчика для измерения угловых колебаний

Основным отличительным элементом датчика является отражательная дифракционная решётка прямоугольного профиля с большой глубиной рельефа h , порядка нескольких длин световой волны λ . Решётка располагается на исследуемом объекте. На практике целесообразно использовать дифракционные решётки прямоугольного профиля с одинаковой шириной выступов и впадин. Толщина (несколько микрон) и масса этого элемента весьма малы. Более того, рельеф решётки может быть сформирован непосредственно на поверхности исследуемого объекта. Это даёт возможность применять датчик для измерения колебаний лёгких объектов. На решётку под углом падения Θ направляется лазерный пучок. Предпочтительно, чтобы плоскость падения-отражения лазерного пучка была параллельна штрихам дифракционной решётки. В отражённом лазерном пучке образуется пространственная фазовая модуляция волнового фронта (ПФМ) в форме меандра с амплитудой ПФМ, равной

$$\Phi_M = \frac{\Delta\varphi}{2} = \frac{(2\pi h \cos \Theta)}{\lambda}, \quad (1)$$

где $\frac{\Delta\varphi}{2}$ — разность фаз между двумя лучами, отражёнными от выступа и впадины. Анализ пространственного спектра при дифракции лазерного пучка на решётке с прямоугольным профилем в форме меандра даёт следующие формулы для расчёта мощностей пучков нулевого и первых порядков дифракции [5]:

$$\begin{aligned} P_0 &= P_{\text{пад}} R \cos^2 \Phi_M, \\ P_{\pm 1} &= \left(\frac{4}{\pi^2} \right) P_{\text{пад}} R \sin^2 \Phi_M, \\ P_{2k} &= 0, \quad (\text{при } k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \end{aligned} \quad (2)$$

В этих формулах $P_{\text{пад}}$ — мощность падающего лазерного излучения, R — коэффициент отражения плёнки металла на поверхности решётки. Сравнивая выражения для мощностей излучения нулевого и первых порядков, можно заметить, что амплитуда изменений мощности нулевого порядка в зависимости от Φ_M превышает в $\frac{\pi^2}{4}$ раз амплитуду изменений мощностей первых порядков. Поэтому в дальнейшем целесообразно рассмотреть более подробно нулевой порядок дифракции. После подстановки выражения (1) в (2) получим выражение зависимости мощности дифрагированного пучка нулевого порядка от угла падения лазерного пучка:

$$P_0 = P_{\text{пад}} R \cos^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} h \cos \Theta \right) = P_{\text{эфф}} \cos^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} h \cos \Theta \right). \quad (3)$$

Здесь для сокращения записи введена величина эффективной мощности падающего лазерного излучения $P_{\text{эфф}} = P_{\text{пад}} R$. Следует заметить, что формула (3)

получена для решётки с идеальным прямоугольным профилем, когда ширина выступа профиля равна ширине впадины. На практике в процессе изготовления дифракционных решёток могут иметь место отклонения от формы идеального меандра. В случае, когда ширина выступа не равна ширине впадины, зависимость мощности нулевого порядка от угла падения пучка описывается следующей формулой [5]:

$$P_0 = P_{\text{эфф}} \left[\cos^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} h \cos \Theta \right) + \left(\frac{2\Delta\Lambda}{\Lambda} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} h \cos \Theta \right) \right], \quad (4)$$

где $\Delta\Lambda$ — уширение выступа.

Графики зависимостей $P_0(\Theta)$, рассчитанные по формуле (3) при разных значениях глубины h , приведены на рис. 2. Середины линейных участков отмечены на графиках точками T_1, T_2, T_3 и т. д. При расчётах принималось, что $P_{\text{эфф}} = 1$ мВт.

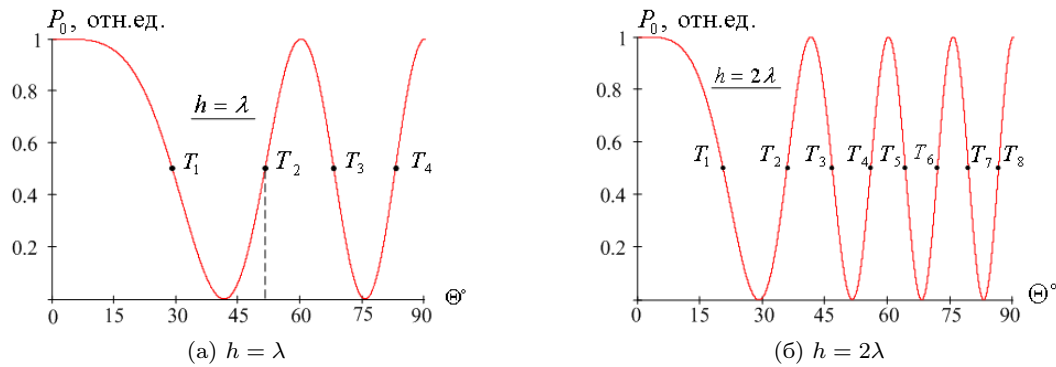


Рис. 2. Графики зависимостей $P_0(\Theta)$ для разных значений глубины решётки h

Из графиков видно, что зависимости имеют осциллирующий характер. Частота осцилляций мощности $P_0(\Theta)$ возрастает при увеличении угла падения Θ . Физически это обусловлено тем, что при увеличении угла падения Θ происходит уменьшение Φ_M . Кроме того, количество осцилляций в диапазоне углов $0^\circ - 90^\circ$ возрастает также при увеличении глубины рельефа h . На зависимостях $P_0(\Theta)$ можно выделить линейные участки, на которых в окрестности точек T_1, T_2, \dots, T_i , в определённом диапазоне углов реализуется режим линейного преобразования угловых смещений решётки (блока-сенсора) в изменение мощности нулевого порядка дифракции.

Крутизна изменения мощности нулевого порядка в зависимости от угла наклона определяется как производная функции $P_0(\Theta)$ по углу Θ :

$$S = \frac{dP_0}{d\Theta} = P_{\text{эфф}} \frac{2\pi h}{\lambda} \sin \left(\frac{4\pi h}{\lambda} \cos \Theta \right). \quad (5)$$

Следует отметить, что крутизна преобразования не зависит от периода решётки Λ . Положения средних точек линейных участков зависимости $P_0(\Theta)$ соответствуют углам падения, равным:

$$\Theta_k = \arccos \left(\frac{2k+1}{8} \cdot \frac{\lambda}{h} \right), \quad \text{где } k \geq 0. \quad (6)$$

В этой формуле значению $k = 0$ соответствует угол Θ_k , наиболее близкий к 90° , а при увеличении индекса k значения углов Θ_k уменьшаются. При этом разным значениям глубин h соответствует разное количество линейных участков и,

соответственно, углов Θ_k . Найдём соотношение, задающее общее число k линейных участков зависимости $P_0(\Theta)$ при определённом значении глубины h . Из (6) следует, что $\frac{2k+1}{8} \cdot \frac{\lambda}{h} \leq 1$, $k \in Z$. Поэтому $k \leq \frac{4h}{\lambda} - \frac{1}{2}$, $k \in Z$. Приведём примеры. При $\frac{h}{\lambda} = 1$ получим, что $k \leq 3,5$, следовательно, в этом случае будет 4 линейных участка, соответствующих целым значениям $k = 0, 1, 2, 3$. При $\frac{h}{\lambda} = 2$ получим, что $k \leq 7,5$ и, соответственно, 8 линейных участков. При $\frac{h}{\lambda} = 3$ получим $k \leq 11,5$ и 12 линейных участков. Очевидно, что при увеличении глубины увеличивается количество периодов и линейных участков. Значения крутизны преобразования, соответствующие углам падения Θ_k , можно рассчитать по формуле:

$$|S_k| = P_{\text{эфф}} \frac{2\pi h}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{2k+1}{8} \cdot \frac{\lambda}{h}\right)^2}, \quad \text{где } k \geq 0. \quad (7)$$

Следует обратить внимание на то, что на рис. 2 нумерация точек T_i отлична от нумерации значений S_k . В формуле (6) меньшему значению индекса k соответствует большее значение угла Θ_k , а на рис. 2 нумерация точек T_i начинается с наименьших углов падения.

Для примера приведём в табл. 1 расчётные значения величин углов падения Θ_k и крутизны S_k для первых четырёх точек T_i при $\frac{h}{\lambda} = 1$, $\frac{h}{\lambda} = 2$ и $\frac{h}{\lambda} = 3$. При расчёте крутизны принималось, что $P_{\text{эфф}} = 1 \text{ мВт}$. Как видно из данных, приведённых в таблице, и графиков, представленных на рис. 2, крутизна преобразования возрастает при увеличении угла падения лазерного пучка и глубины рельефа решётки.

Таблица 1

Расчётные значения углов падения Θ_k и крутизны преобразования S_k на серединах линейных участков для трёх величин отношений $\frac{h}{\lambda}$

$\frac{h}{\lambda}$	точка T_1	точка T_2	точка T_3	точка T_4
1	$k = 3$ $\Theta_3 = 29,0^\circ$ $S_3 = -3,0 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$	$k = 2$ $\Theta_2 = 51,3^\circ$ $S_2 = 4,9 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$	$k = 1$ $\Theta_1 = 68,0^\circ$ $S_1 = -5,8 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$	$k = 0$ $\Theta_0 = 82,8^\circ$ $S_0 = 6,2 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$
2	$k = 7$ $\Theta_7 = 20,4^\circ$ $S_7 = -4,4 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$	$k = 6$ $\Theta_6 = 35,7^\circ$ $S_6 = 7,3 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$	$k = 5$ $\Theta_5 = 46,6^\circ$ $S_5 = -9,1 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$	$k = 4$ $\Theta_4 = 55,8^\circ$ $S_4 = 10,4 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$
3	$k = 11$ $\Theta_{11} = 16,6^\circ$ $S_{11} = -5,4 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$	$k = 10$ $\Theta_{10} = 29,0^\circ$ $S_{10} = 9,1 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$	$k = 9$ $\Theta_9 = 37,7^\circ$ $S_9 = -11,5 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$	$k = 8$ $\Theta_8 = 44,9^\circ$ $S_8 = 13,3 \frac{\text{мВт}}{\text{мрад}}$

На практике угол падения целесообразно выбрать в диапазоне $\Theta_k \leq 60^\circ$, так как при больших углах падения возникают затруднения, связанные с использованием скользящих пучков. В частности, резко возрастает размер следа оптического пучка на поверхности решётки, и в результате часть пучка может выйти за пределы решётки.

3. Экспериментальные результаты

Была проведена серия экспериментов по измерению статических характеристик датчиков. Исследовались зависимости напряжения на выходе фотодетектора, расположенного в нулевом дифракционном порядке, от изменения угла падения лазерного пучка в диапазоне от $\Theta = 0^\circ$ до углов, близких к 90° . Период используемых решёток лежал в диапазоне от 50 до 200 мкм. Эти значения

выбирались из условий хорошего разделения порядков и минимизации отклонений формы решёток от прямоугольной. Рельефы на стеклянных подложках были изготовлены методом химического травления. Отражающее покрытие — плёнка алюминия. Глубина решёток контролировалась с помощью профилометра Dectac 150. Измерения производились на установке, собранной по схеме, подобной схеме, показанной на рис. 1. В установке использовались: гелий-неоновый лазер ГН-15 (длина волны излучения $\lambda = 0,6328$ мкм, мощность 15 мВт), фотодетектор ФД-24К, гониометр ГУР-3.

Результаты экспериментов, проведённых на образцах решёток с периодом 100 мкм, приведены на рис. 3. Совмещение вертикальных масштабов расчётных и экспериментальных кривых проводилось путём нормировки значений экспериментальных данных на величину измеренного выходного сигнала в первом максимуме зависимости выходного сигнала от угла падения.

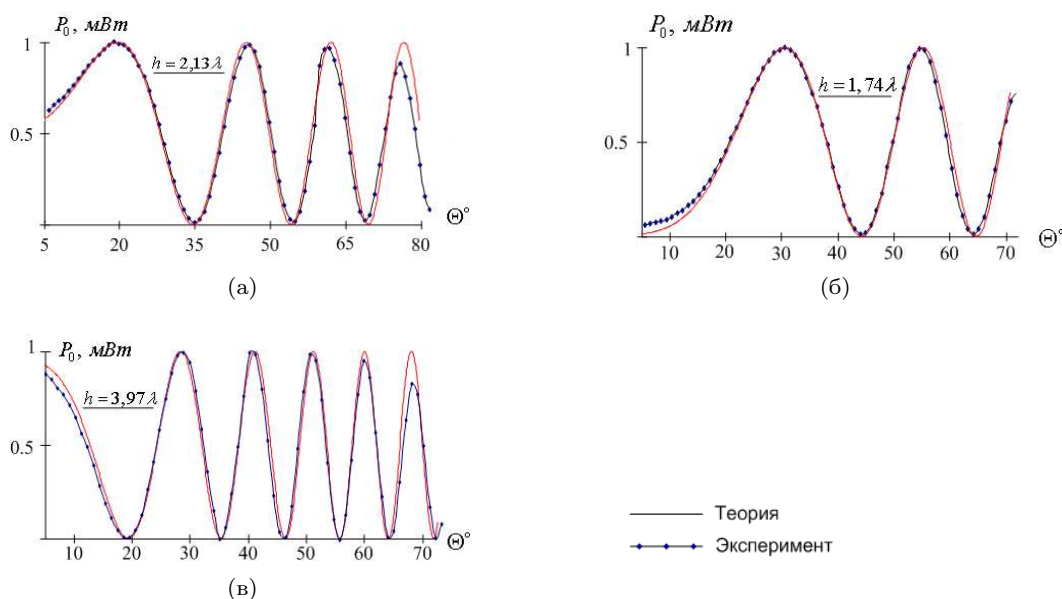


Рис. 3. Графики теоретической и экспериментальной зависимостей $P_0(\Theta)$ для отражающих решёток. Параметры решёток: $\Lambda = 100$ мкм, $h = 1,74\lambda$ (а), $h = 2,13\lambda$ (б), $h = 3,97\lambda$ (в)

Как видно из приведённых графиков, наблюдаются очень малые отклонения экспериментальных зависимостей от расчётных, по крайней мере в области углов падения от 0° до 60° .

Чувствительность датчика будет определяться шумами различного происхождения. Наряду с тепловым шумом сопротивления нагрузки и собственным шумом усилителя выходного сигнала существенный вклад вносят дробовые шумы постоянной составляющей фототока $I_{\Phi}^{(=)}$. Величина $I_{\Phi}^{(=)} = S_{\frac{A}{Bт}} \cdot (0,5P_{\Phiф})$, где величина $S_{\frac{A}{Bт}}$ — ампер-ваттная чувствительность фотодетектора. Величину этих составляющих шумов легко рассчитать. Помимо этого вклад в величину суммарного шума могут давать такие факторы, как флуктуации мощности лазерного излучения, флуктуации направления лазерного излучения, сейсмические шумы. Приведём некоторые данные, оценивающие чувствительность датчика. При полосе пропускания измерительного канала $\Delta F = 1000$ Гц, мощности лазера $P_{\Phiф} = 1$ мВт, величине $S_{\frac{A}{Bт}} = 0,24 \frac{A}{Bт}$ дробовые шумы фототока будут равны $\sqrt{i_{шд}^2} = 1,95 \times 10^{-10}$ А. При резисторе нагрузки $R_{н} = 10$ кОм величина

тока тепловых шумов нагрузки составит $\sqrt{i_{\text{шн}}^2} = 4 \times 10^{-11}$ А. Суммарная величина шумового тока $\sqrt{i_{\text{ш}\Sigma}^2} = 1,99 \times 10^{-10}$ А. Тогда на средней точке линейного участка с учётом крутизны преобразования для одного из датчиков $S = 0,015 \frac{\text{Вт}}{\text{рад}}$ и ампер-ваттной чувствительности фотодетектора $S_{\frac{\text{А}}{\text{Вт}}} = 0,24 \frac{\text{А}}{\text{Вт}}$ реальную чувствительность при отношении сигнала к шуму $\frac{c}{\text{ш}} = 10$ можно оценить величиной порядка $\Delta\varphi_{\text{min}} = 7 \times 10^{-7}$ рад. Эту оценку можно рассматривать как предельную. Реальная чувствительность будет ниже из-за влияния других, упомянутых выше факторов. В области низких частот, порядка единиц и десятков герц, сильно заметно влияние сейсмических шумов. В области частот выше килогерца влияние сейсмических и фликкер-шумов становится малым, и реальная чувствительность повышается, но ещё не достигает предельной.

Были проведены экспериментальные измерения чувствительности на специальном макете, включающем вибрирующую пластину и электромагнитный возбудитель. С помощью генератора ГЗ-2 возбуждали электромагнитный возбудитель и пластину в диапазоне частот от 0 до 1000 Гц. Измерения показали, что реальная чувствительность датчика угловых колебаний на частоте 1000 Гц при полосе частот $\Delta F = 800$ Гц составила $\Delta\varphi_{\text{min}} = 5 \times 10^{-6}$ рад при отношении сигнала к шуму $\frac{c}{\text{ш}} = 10$.

4. Основные результаты

В работе предложена новая оригинальная конструкция датчика угловых перемещений на основе отражающей рельефной дифракционной решётки с глубиной, превышающей четверть длины волны падающего лазерного излучения. Отличительной особенностью измерителя является то, что при его использовании практически отсутствуют помехи, связанные с переотражениями пучков от различных плоскостей системы. Кроме того, датчик может регистрировать смещения как в плоскости, перпендикулярной штрихам решёток, так и в плоскости, параллельной им. Достоинством датчика является удобство и простота измерений, при этом масса датчика и его размеры могут быть очень малыми. Экспериментально подтверждена высокая чувствительность датчика, которая составила $\Delta\varphi_{\text{min}} = 5 \times 10^{-6}$ рад в полосе частот 0,8 кГц при отношении сигнала к шуму $\frac{c}{\text{ш}} = 10$. Датчик может найти применение для исследования колебаний и волн, в научных экспериментах при исследованиях вибраций и колебаний.

Литература

1. Комоцкий В. А., Корольков В. И., Соколов Ю. М. Исследование датчика малых линейных перемещений на основе жвух фазовых дифракционных решёток // Автометрия. — 2006. — Т. 42, № 6. — С. 105–112.
2. Комоцкий В. А., Соколов Ю. М. Оптоэлектронный измеритель угловых колебаний конструкций // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». — 2007. — № 1–2. — С. 138–146.
3. Комоцкий В. А., Соколов Ю. М. Оптоэлектронное устройство для измерения угловых колебаний конструкций. — Патент на полезную модель № 57895 (приоритет от 23.05.2006).
4. Комоцкий В. А., Соколов Ю. М. Оптоэлектронный датчик угловых отклонений и колебаний. — Патент на полезную модель № 80563 (приоритет от 15.08.2008).
5. Каценко Н. М., Комоцкий В. А. Определение глубины опорных дифракционных решёток на основе измерения и анализа дифракционных порядков // Вестник РУДН. Серия Физика. — 1999. — № 7. — С. 55–65.

UDC 535.42:681.786.23

Investigations of an Optoelectronic Device for Angular Displacements Measurements with Use of a Deep Phasetype Reflective Grating

V. A. Komotskii, Yu. M. Sokolov, A. N. Alexeev, E. V. Basisty

*Department of Radiophysics
Peoples' Friendship University of Russia
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia*

An optoelectronic device for measurements of small angular displacements based on a diffraction of a laser beam on a deep reflective phasetype grating was suggested and investigated. The grating's depth is about several wavelengths. The zero diffraction order's power dependency on the incident angle of a laser beam was investigated theoretically and experimentally. There were found conditions when linear conversion of angular vibrations into changes of power of zero order took place. The experimentally measured sensitivity of the device was 5×10^{-6} rad with channel bandwidth of 800 Hz and signal-to-noise ratio 10.

Key words and phrases: optoelectronic sensor, sensor of displacements, small angular displacements, phase diffraction grating.