

# ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ МАЛЫХ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

В.Комоцкий, В.Корольков, Ю.Соколов, РУДН, Москва

В основе работы датчиков малых угловых перемещений и колебаний, рассмотренных в обзоре, лежат принципы дифракции лазерного излучения на системе пространственно разделенных периодических решеток. В статье представлены результаты разработки и исследования новых схем, в том числе с зеркальной пленкой.

Пучок когерентного света с длиной волны  $\lambda$  последовательно проходит через две дифракционные решетки с одинаковым периодом  $\Lambda$  (рис.1). При условии, что размер зондирующего пучка  $D$  много больше  $\Lambda$ , порядки дифракции хорошо разделяются. Один из порядков выделяем и направляем на фотодетектор, с выхода которого получаем электрический сигнал, пропорциональный мощности излучения выбранного порядка. Результаты исследования данной оптической схемы приведены в [1, 2]. Анализ показал, что наибольший интерес для построения датчиков перемещений представляют схемы, в которых применяются рельефные фазовые решетки с прямоугольным профилем типа «меандр». Причина кроется в том, что в их пространственном спектре отсутствуют четные порядки дифракции. Было показано, что оптимальная величина амплитуды пространственной фазовой модуляции волнового фронта, полученная в результате взаимодействия оптической волны с каждой решеткой, должна быть равна  $\Phi_m = 45^\circ$ . Выражения, описывающие зависимости мощностей дифрагированных пучков первых порядков  $P_{\pm 1}(x)$  от перемещения одной из решеток вдоль оси  $X$ , принимают простой вид:

$$P_{\pm 1}(x) = P_i \cdot \left( \frac{2}{\pi^2} + \frac{2}{\pi^2} \cos \left( \frac{2\pi}{\Lambda} x \mp \frac{\pi \lambda \ell_z}{\Lambda^2} \right) \right), \quad (1)$$

где  $P_i$  – мощность лазерного излучения на входе схемы.

Как видно из формулы (1), мощность дифрагированного излучения в каждом из первых порядков изменяется от нулевой до максимальной величины при смещении одной решетки относительно другой вдоль оси  $OX$ . В типичных расчетных графиках (рис.2) зависимостей  $P_{\pm 1}(x/\Lambda)$  и  $P_0(x/\lambda)$  цифрами -1 и 1 показаны номера дифракционных порядков.

На графиках зависимости  $P_{\pm 1}(x/\lambda)$  всегда можно выделить ряд линейных участков протяженностью  $0,135 \Lambda$  при условии 3%-ного отклонения от линейности. Более сложная ситуация обнаруживается в нулевом порядке дифракции. Как показано в [1, 3], зависимости  $P_0(x)$  состоят из суммы множества пространственных гармоник с пространственными частотами, кратными пространственной частоте  $\xi_1 = \Lambda^{-1}$ . Зависимости  $P_0(x)$  неустойчивы и существенно меняют свою форму при изменении расстояния  $\ell_z$  между решетками. Это обстоятельство осложняет использование сигнала в нулевом порядке дифракции в измерительной схеме.

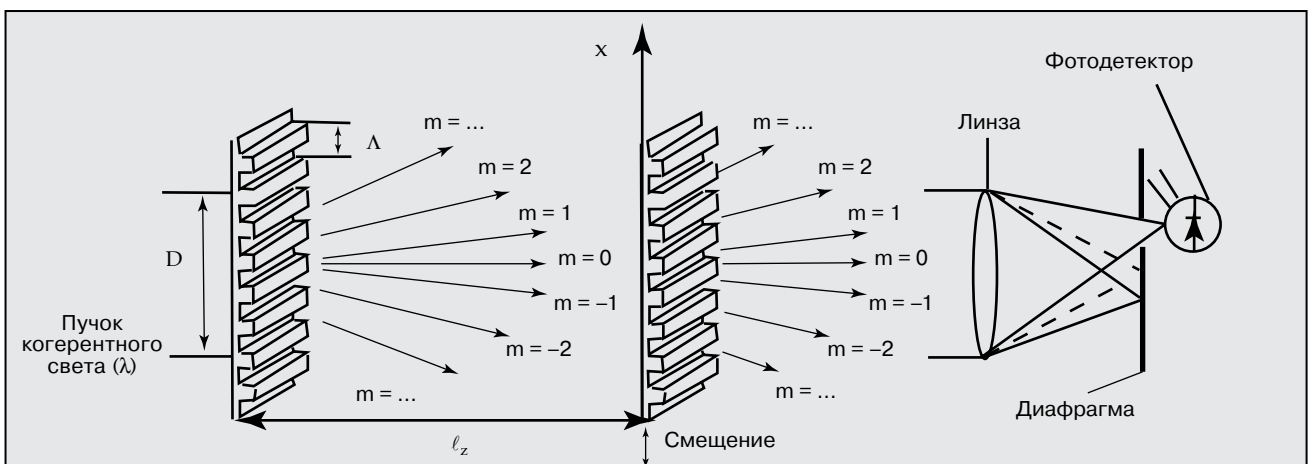


Рис1. Модель измерительной схемы на основе двух фазовых дифракционных решеток

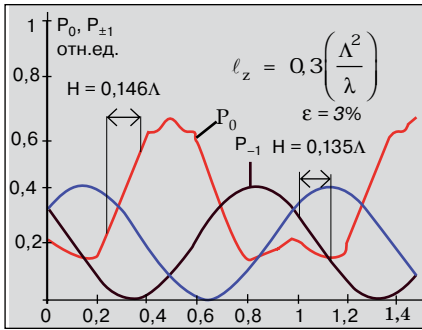


Рис.2. Зависимости мощностей  $P_{\pm 1}$  и  $P_0$  от  $x/\lambda$ . Область линейности  $H$  рассчитана при ошибке  $\varepsilon=3\%$

Датчик малых угловых перемещений с применением блока решеток изображен на рис.3. Блок решеток – это стеклянный параллелепипед с показателем преломления  $n$ , на противоположных гранях которого размещены две фазовые дифракционные решетки с одинаковым периодом  $\Lambda$  и с профилем в виде меандра. Штрихи решеток параллельны. Блок закреплен на оси и просвечивается лазерным пучком.

Первый дифракционный порядок выделяем пространственным фильтром и направляем на фотодетектор, с выхода которого электрический сигнал поступает на схему обработки. При повороте блока относительно оси на угол  $\delta\alpha$  смещение одной решетки относительно другой составит  $\Delta x = \delta\alpha \cdot l_z / n$ . В результате поворота мощность первого порядка изменяется. На линейном участке зависимости мощности от угла поворота блока решеток крутизна преобразования величины угла поворота датчика в величину изменения мощности первого порядка дифракции равна:

$$S_{P_{\alpha}} = \frac{dP_1}{d\alpha} = \frac{4}{\pi} P_1 \cdot \frac{l_z}{n\Lambda} \quad (2)$$

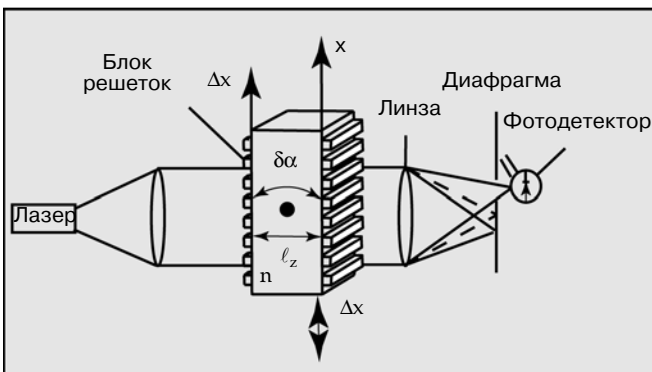


Рис.3. Схема датчика малых угловых перемещений с применением блока решеток

Расчеты датчика при рабочих параметрах схемы  $P_1 = 1$  мВт,  $l_z = 10$  мм и  $\Lambda = 0,1$  мм,  $n = 1,51$  показали чувствительности  $S_{P_{\alpha}} = 84$  мВт/рад.

### МАКЕТ ИЗМЕРИТЕЛЯ НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

В работах [4, 5] описан макет, имеющий параметры блока решеток:  $\Lambda = 200$  мкм,  $l_z = 13$  мм,  $n = 1,5$ . Блок закреплен на оси и связан с иглой, которую вводят в контакт с поверхностью исследуемого образца. Образец перемещается относительно иглы. Линейное перемещение иглы  $\Delta x$  под действием неровностей поверхности вызывает угловое перемещение блока решеток и пропорциональное ему изменение выходного сигнала. Управление измерительной установкой осуществляется программно с помощью технологии LabVIEW. Чувствительность датчика к варьированию поверхностных неровностей, измеренная в статическом режиме, составила  $0,008$  мкм, ее ограничивают преимущественно собственные шумы 16-разрядного АЦП. Предельная расчетная чувствительность к перемещению при учете собственных шумов на аналоговом выходе датчика составляет величину менее  $1$  нм при работе на полосе частот  $100$  Гц и отношении  $c/\omega=3$ . Существенный вклад в состав шумов на аналоговом выходе дает дробовый шум фототока, поскольку середине линейного участка аппаратной характеристики прибора соответствует определенная постоянная мощность излучения в первом дифракционном порядке и, соответственно, постоянный ток фотодиода.

### ДАТЧИК С ЗЕРКАЛЬНОЙ ПЛЕНКОЙ

Оптическая схема датчика малых угловых перемещений и колебаний с зеркальной пленкой [6] (рис.4) содержит блок-сенсор, в котором вторая решетка образуется с помощью зеркального отражения одиночной решетки. Блок представляет собой прозрачную пластину, на одной стороне которой расположена фазовая дифракционная решетка с прямоугольным профилем, а на другой стороне – зеркальная отражающая пленка. Расчеты оптимальных параметров решетки приведены в [7]. Блок-сенсор закрепляем на исследуемой конструкции и зондируем лазерным пучком, который дифрагирует на фазовой дифракционной решетке, распространяется в прозрачном материале пластины, отражается от зеркальной пленки и повторно дифрагирует на той же решетке. Один из первых дифракционных порядков выделяем с помощью простейшего фильтра и направляем на фотодетектор. Электрический сигнал с выхода фотодетектора поступает на схему обработки. При наклоне блока-сенсора происходит смещение следов падающего и отраженного пучков по поверхности решетки. Связь между относительным смещением этих следов  $\Delta x$  и углом наклона блока-сенсора  $\delta\alpha$  можно выразить приближенной формулой  $\Delta x = 2\delta\alpha \cdot d/n$ , где  $d$  – толщина, а  $n$  – показатель преломления материала блока-сенсора. Зависимость мощности излучения в первом дифракционном порядке от угла наклона блока-сенсора имеет осциллирующий характер, подобный зависимости на рис.2. Для измерения малых угловых колебаний исполь-

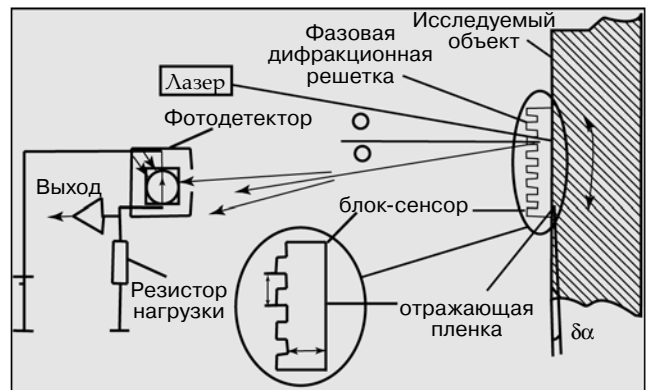


Рис.4. Схема оптоэлектронного датчика для измерения угловых колебаний

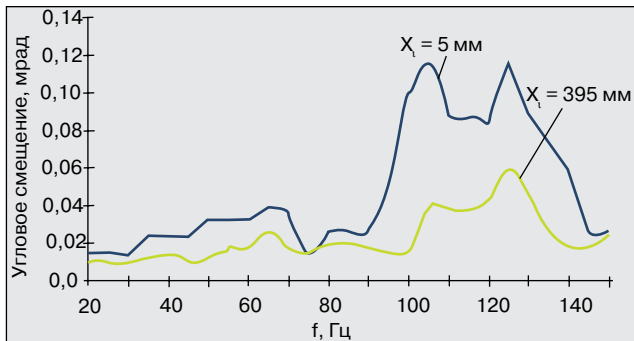


Рис.5. Зависимости амплитуд угловых смещений от частоты внешнего возбуждения  $f$  при различных положениях датчика на планке ( $X_1$  – расстояние от края планки)

зуется один из линейных участков зависимости мощности первого порядка дифракции от угла наклона блока-сенсора. Выбор оптимальной рабочей точки достигается настройкой начального угла падения лазерного пучка.

### ПРАКТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ

Для оценки практической возможности применения датчика данного типа были проведены измерения характеристик угловых колебаний конструкции. Она представляла собой металлическую планку сечением  $6 \times 30$  мм и длиной 400 мм, закрепленную на двух вертикальных стойках. Блок-сенсор прикреплялся к металлической планке в разных точках с помощью клейкой ленты. Толщина блока-сенсора составляла  $d = 7,5$  мм, его поперечные размеры  $10 \times 10$  мм, а период решетки  $\Lambda = 100$  мкм. Колебания конструкции возбуждали с помощью электромагнитного вибратора. Результаты измерений зависимости амплитуды угловых колебаний от частоты показаны на рис.5. Отмечаем резонансные пики на частотах 105 Гц и 125 Гц. Экспериментально измеренная чувствительность составила  $3 \cdot 10^{-5}$  радиан при отношении  $c/\lambda = 3$  и полосе частот 1 кГц. Область линейности в графической зависимости амплитуды выходного сигнала от углового отклонения равна  $10^{-3}$  радиан при условии, что ошибка отклонения от линейности составит  $\leq 3\%$ . Из-за сейсмических колебаний, сопутствующих эксперименту, а также угловых флуктуаций лазерного излучения измеренный порог чувствительности датчика оказался на два порядка хуже порога, рассчитанного с учетом

дробовых шумов фототока и собственных шумов усилителя сигнала. Эти датчики могут найти применение в конструкции сейсмометров и при измерениях колебаний в физических экспериментах и приборах.

### ДАТЧИК НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОЙ ФАЗОВОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Основным элементом оптоэлектронного датчика (рис.6), является тонкая пластина, на поверхность которой нанесена рельефная дифракционная решетка с прямоугольным профилем типа меандра [8, 9]. Рельеф покрыт металлической пленкой, обладающей высоким коэффициентом отражения лазерного излучения, например пленкой алюминия или серебра. Другой стороной пластину прикрепляют к объекту. Глубина рельефа решетки  $h \geq \lambda/4$ . На практике  $h$  составляет порядка нескольких  $\lambda$ . Пучок излучения лазера направляем под определенным углом  $\theta$  на дифракционную решетку. Плоскость падения-отражения лазерного пучка параллельна линиям, образующим профиль решетки. В отраженном пучке с помощью щелевой диафрагмы выделяем пучок нулевого порядка дифракции, направляем его на фотодетектор, с выхода которого при определенной начальной настройке угла падения лазерного пучка получаем электрический сигнал, пропорциональный угловому отклонению решетки.

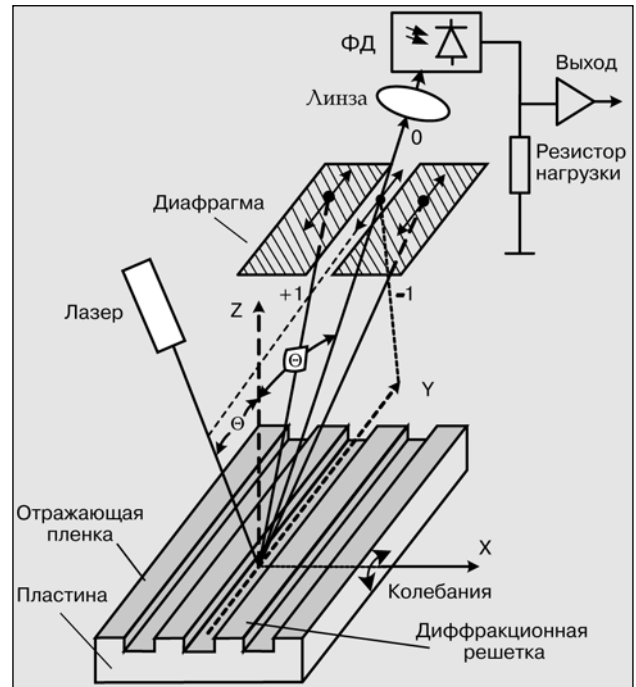


Рис.6. Схема оптоэлектронного датчика угловых смещений и колебаний на основе глубокой фазовой дифракционной решетки

В результате отражения от рельефной решетки на волновом фронте лазерного пучка образуется пространственная фазовая модуляция с формой меандра. Амплитуда этой модуляции  $\Phi_m$  равна половине разности фаз  $\Delta\varphi$  между двумя лучами, отраженными от выступа и впадины, и ее можно рассчитать по следующей формуле:

$$\Phi_m = \frac{\Delta\varphi}{2} = \frac{2\pi h}{\lambda} \cos\theta \quad (3)$$

Анализ пространственного спектра оптической волны, отраженной от периодической структуры с формой «меандр», дает следующую формулу для расчета зависимости мощности дифрагированного пучка нулевого порядка от глубины рельефа и угла падения лазерного пучка [9]:

$$P_0 = P_i R \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} h \cos\theta\right), \quad (4)$$

где  $R$  – коэффициент отражения светового пучка от поверхности.

Исследуем зависимость (4). Для наглядности и некоторого упрощения положим, что коэффициент отражения поверхности  $R$  не зависит от угла падения зондирующего лазерного пучка. Это условие достаточно хорошо выполняется при отражении от поверхности, покрытой металлической пленкой, в диапазоне углов паде-

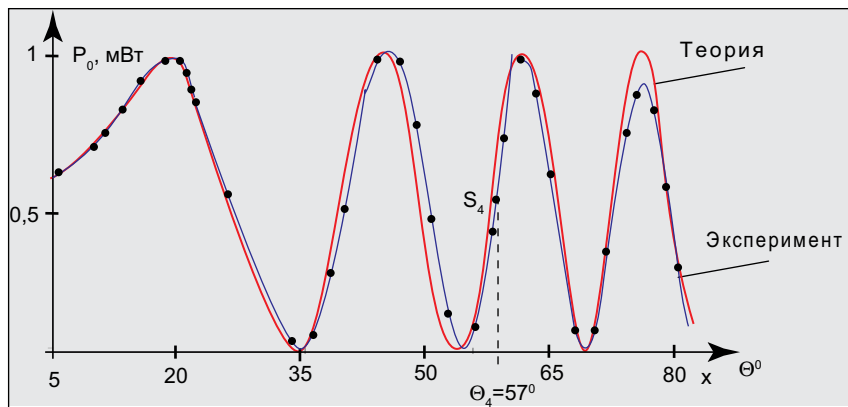


Рис.7. Расчетная и экспериментальная зависимость  $P_0(\theta)$ ,  $h=1,35$  мкм

ния, используемых в схеме датчика. При глубине рельефа, превышающей величину  $h \geq \lambda/4$ , зависимость мощности нулевого порядка от угла падения лазерного пучка  $P_0(\theta)$  имеет осциллирующий характер, и содержат линейные участки. На рис.7 приведена расчетная зависимость  $P_0(\theta)$  для рельефной отражающей решетки с глубиной, равной  $h=1,35$  мкм, при  $\lambda = 0,6328$  мкм. Для подтверждения достоверности тут же приведена и экспериментальная зависимость  $P_0(\theta)$ , которая очень близка к расчетной. Найдены аналогичные зависимости и для других глубин

Для измерения угловых смещений и колебаний поверхности следует выбрать один из линейных участков зависимости  $P_0(\theta)$ . Крутизна линейного преобразования углового отклонения в изменение мощности нулевого порядка повышается при увеличении глубины рельефа. Расчетное значение крутизны на четвертом линейном участке, обозначенном на рис.7 как

$S_4$ , при мощности излучения на входе схемы  $P_i = 1$  мВт,  $R = 0,9$  составляет величину  $S_4 = 10,3$  мВт/рад. При сопротивлении резистора нагрузки  $r = 1$  кОм, полосе пропускания  $\Delta f = 100$  Гц и при отношении  $c/\lambda = 3$  предельное значение порога регистрации угловых колебаний оценивается величиной порядка  $\Delta\varphi_{\min} = 10^{-6}$  радиан. Практические испытания дали результат  $\Delta\varphi_{\min} = 5 \cdot 10^{-6}$  радиан.

Новые типы датчиков угловых перемещений достаточно просты, обладают высокой чувствительностью, с их помощью можно регистрировать как статические угловые перемещения, так и угловые колебания объекта и его частей. В их конструкции можно использовать недорогие полупроводниковые лазеры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ниибизи А, Комоцкий В. Теор. анализ взаимодействия оптической волны с системой пространственно разделенных периодических решеток. – Москва, ВИНТИ, 1985, № 661.

2. Комоцкий В., Никулин В. Теоретический анализ дифракции гауссова оптического пучка на системе из двух дифракционных решеток. – Оптика и спектроскопия, 1987, вып.2, с. 409–415.

3. Комоцкий В., Соколов Ю. Анализ интенсивностей дифракционных порядков в оптической схеме, содержащей две фазовые дифракционные решетки. – Вестник РУДН. Сер. Физика, 2006, № 1.

4. Комоцкий В., Корольков В. Устройство для измерения малых линейных перемещений. Патент на изобретение № 2277695, 2006.

5. Комоцкий В., Корольков В., Соколов Ю. Исследование датчика малых линейных перемещений на основе двух фазовых дифракционных решеток. – Автоматика, 2006, т. 42, № 6.

6. Комоцкий В., Соколов Ю. Оптоэлектронное устройство для измерения угловых колебаний конструкций. Патент на полезную модель №57895.

7. Комоцкий В., Соколов Ю. Оптоэлектронный измеритель угловых колебаний конструкций. – Вестник РУДН. Сер. Мат-ка, инф-ка, физика, 2007, № 1.

8. Комоцкий В., Соколов Ю. Оптоэлектронный датчик угловых отклонений и колебаний. Патент на полезную модель № 80563, 2008.

9. Алексеев А., Басистый Е., Комоцкий В. и др. Исследование оптоэлектронного датчика угловых смещений и колебаний на основе глубокой отражательной фазовой дифракционной решетки. – Вестник РУДН. Сер. Мат-ка, информ-ка, физика, 2009, № 4.