

## 24. Оценка погрешности фазовых сдвигов в порядках дифракционных решеток интерференционного датчика линейных перемещений

М. В. Шишова<sup>1</sup>, С. Б. Одинокоев<sup>1</sup>, А. Ю. Жердев<sup>1</sup>, М. С. Ковалев<sup>1</sup>, М. Л. Галкин<sup>1</sup>,  
В. Ю. Венедиктов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье рассматриваются фазовые сдвиги света в порядках дифракционных решеток для интерференционного датчика линейных перемещений. Применение фазовой дифракционной решетки с заданными геометрическими параметрами поверхностного рельефа позволяет стабилизировать фазовые соотношения в оптических сигналах и, в результате, в итоговой паре квадратурных сигналов, снимаемых с датчика перемещений. На основе математического моделирования предложены технически реализуемые параметры поверхностного рельефа дифракционных решеток для создания требуемых фазовых сдвигов между дифрагированными пучками, сигналами квадратурной модуляции и достижения требуемой точности измерений с нанометрическим разрешением.

*Ключевые слова:* Фазовый сдвиг, Датчик линейных перемещений, Квадратурные сигналы.

*Цитирование:* Шишова, М. В. Оценка погрешности фазовых сдвигов в порядках дифракционных решеток интерференционного датчика линейных перемещений / М. В. Шишова, С. Б. Одинокоев, А. Ю. Жердев, М. С. Ковалев, М. Л. Галкин, В. Ю. Венедиктов // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 119–129.

### 1. Введение

На сегодняшний день измерения линейных и угловых перемещений с нанометрическим разрешением обеспечиваются интерференционными оптическими датчиками [1–4]. В таких датчиках при равномерном линейном перемещении измерительной головки относительно кодирующей шкалы формируются гармонические сигналы, последующее декодирование которых в электронном блоке, позволяет получить величину перемещения. Оптические сигналы, характеризующие линейные перемещения, формируются в оптической системе датчика и сохраняют постоянный период интерференционной картины в пространстве с помощью рельефно-фазовых дифракционных решеток — измерительных шкал. Для обеспечения высокого разрешения датчика, а также для определения направления линейного перемещения необходимо как минимум два оптических сигнала, составляющие квадратурную пару (синусоидальный SIN и косинусоидальный COS) [5, 6]. Период оптических сигналов пропор-

ционален периоду измерительной шкалы. Шаг измерения формируется путём дискретизации уже электрических сигналов в электронном блоке и вычисления обратной гармонической функции. Тогда величина линейного перемещения внутри периода гармонического сигнала будет определяться фазой текущего уровня оптического сигнала. Причём стабильность разности фаз между оптическими сигналами в процессе перемещения определяет погрешность дискретизации внутри периода сигнала, а значит, величины разрешения и погрешности измерения самого датчика.

Традиционно в оптических системах интерференционных датчиков линейных перемещений стабилизация разности фаз оптических сигналов достигается либо добавлением новых фазовых оптических элементов, либо различными юстировками [5–8] оптико-механических элементов датчика, например, сдвигом и поворотом дифракционной решетки в измерительной головке, наклоном лазера, перекрытием части апертуры пучка и др. Проблема данного подхода выражается в следующем недостатке. В процессе оптико-механических юстировок, движения привода и перемещения измерительной головки относительно кодирующей шкалы, вследствие несовершенства каретки привода, погрешностей направляющих и др., происходит нарушение параллельности измерительной кодирующей шкалы и измерительной головки с анализирующей шкалой. Это приводит к дестабилизации фазовых сдвигов в оптических сигналах из-за изменения длины пути и внесению дополнительной погрешности при измерениях. Использование пропускающей дифракционной решетки с заранее сформированными фазовыми сдвигами в рабочих дифракционных порядках в качестве элемента фазовой задержки позволит обеспечить в оптической схеме датчика стабильную квадратурную модуляцию оптических сигналов без проведения сложной дополнительной оптико-механической или оптической юстировки.

Данная статья посвящена моделированию фазовых сдвигов в порядках дифракционных решеток и расчету параметров их поверхностного рельефа, обеспечивающих повышение точности измерения перемещений до единиц нанометров, выполняемых с помощью интерференционного датчика линейных перемещений.

## **2. Принцип работы интерференционного датчика линейных перемещений**

Оптическая схема интерференционного датчика линейных перемещений построена на основе дифракционных решеток с одинаковыми периодами, сравнимыми с длиной волны источника излучения: кодирующей шкалы (КШ), которая линейно перемещается относительно измерительной головки, и анализирующей шкалы (АШ), расположенной внутри измерительной головки. На рисунке 1 подробно показан ход лучей в оптической схеме датчика и формирование интерференционных оптических сигналов при линейных перемещениях шкал: сплошными линиями изображены пучки света, используемые для формирования оптических сигналов, а пунктирной линией обозначены пучки света, не используемые в оптической схеме и в которых дифракционная эффективность минимизируется. На рисунке 1а показан

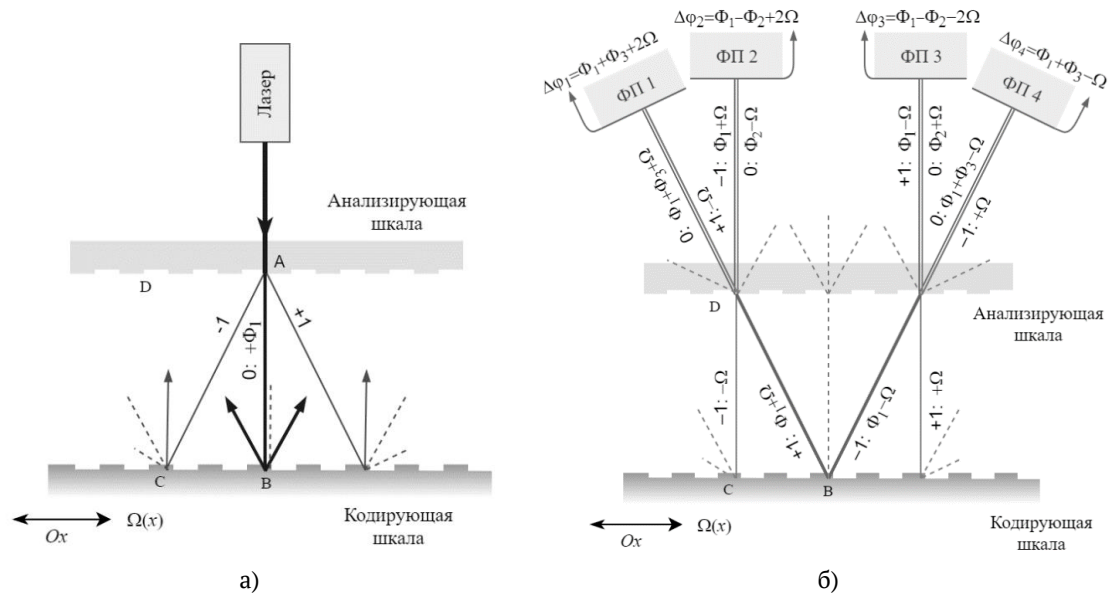


Рис. 1. Ход лучей в оптической схеме при распространении излучения от источника до кодирующей шкалы (а) и при распространении после дифракции на кодирующей шкале(б)

ход лучей пучков лазерного излучения дифрагировавших на АШ (пропускающей дифракционной решетке) и до КШ (отражательной дифракционной решетки), а также дифрагировавших на ней пучков в обратном ходе. На рисунке 1б показан обратный ход лучей при распространении дифрагировавших пучков, отраженных от КШ и до АШ. Причем рассматриваются только пучки в  $\pm 1$  дифракционных порядках, а пучки лазерного излучения более высоких дифракционных порядков не попадают в оптическую схему датчика и в дальнейшем моделировании не рассматриваются.

Рис. 2а иллюстрирует внесение фазового сдвига при первой дифракции на АШ в трех направлениях соответственно  $+1$ ,  $0$  и  $-1$  порядкам дифракции. АШ должна быть сконструирована таким образом, чтобы прошедший луч (отрезок  $AB$ ) опережал дифрагировавшие (отрезок  $AC$ ) по фазе. Обозначим эту величину фазового сдвига  $\Phi_1$ . Далее излучение дифрагирует на КШ, которая является подвижной и вносит фазу  $2\pi$  при её перемещении на величину в один период  $d$ . Тогда при перемещении на величину  $x$  вносимая в дифракционный порядок фаза света равна  $\Omega = \pm 2\pi x/d$ . Причем данный сдвиг фазы прибавляется к текущему при дифракции в  $+1$  порядок ( $+\Omega$ ) и вычитается при дифракции в  $-1$  порядок ( $-\Omega$ ). После дифракции на КШ, каждый пучок снова попадает на АШ, на которой опять дифрагирует в обратном ходе. Прошедшие пучки снова приобретают некоторый фазовый сдвиг относительно дифрагировавших пучков, как показано на рисунке 1б. При нормальном падении излучения со стороны решетки в направлении  $CD$  в  $0$ -ом порядке относительно  $+1$  формируется фазовый сдвиг  $\Phi_2$ . При наклонном падении излучения в направлении  $BD$  величина фазового сдвига в  $0$ -ом порядке относительно  $+1$  составляет  $\Phi_3$ . Пары пучков, которые распространяются в одном направлении, интерферируют в плоскости каждого ФП1–ФП4. В предложенной оптической схеме в силу симметрии обеспечивается равенство оптических путей интерферирующих пучков.

В отъюстированной оптической системе на каждом из приемников наблюдается интерференционная полоса бесконечной ширины. Интенсивность света каждого из интерференционных оптических сигналов, полученных при интерференции пучков с комплексными амплитудами световых волн  $A = |A| \exp(i\Phi_A)$  и  $B = |B| \exp(i\Phi_B)$  в плоскости каждого  $k$ -го фотоприемника (от ФП1 до ФП4), определяется по формуле

$$I_k = |A_k|^2 + |B_k|^2 + 2|A_k||B_k| \cos(\Phi_{A_k} - \Phi_{B_k}) = \frac{1}{|A_k|^2 + |B_k|^2} [1 + V_k \cos(\Delta\varphi_k)].$$

где  $V_k = \frac{2|A_k||B_k|}{\sqrt{|A_k|^2 + |B_k|^2}}$  — интерференционный контраст.

На рисунке 1b показаны фазовые составляющие  $\Delta\varphi_k$ , сформированные в оптических сигналах в плоскости каждого фотоприемника после прохождения всей оптической схемы. Пары ФП1 и ФП2, а также ФП3 и ФП4, можно использовать для определения величины линейного перемещения  $x$  при условии сохранения разности фаз  $90^\circ$  между итоговыми оптическими сигналами на фотоприемниках [9]. К такой реализации приводит комбинация фазовых сдвигов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ , сформированных в оптических сигналах после прохождения излучения через АШ в оптической схеме.

Таким образом, АШ в схеме должна не только обеспечивать эффективное деление пучка, но и начальную разность фаз для квадратурной модуляции пар интерференционных сигналов. В условиях рассматриваемой задачи моделирования одинаково важно учитывать, как накопленную фазовую составляющую, так и энергетический расчет, для каждого из пучков.

Вносимые в дифрагировавшие пучки фазовые сдвиги (как показано на рисунках 1a и 1б) в представленном моделировании рассматриваются для пучка 0-го порядка относительно  $\pm 1$ -х порядков и представляют собой разности накопленных фаз [10]. Неравенство представленных значений фазовых сдвигов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  для различных условий освещения подтверждено экспериментально и при решении задачи дифракции на основе электромагнитной теории [11]. Если бы все три случая обеспечивали одинаковый фазовый сдвиг  $\Phi$ , то это упростило бы формирование фазовой составляющей  $\Delta\varphi_k$  для боковых приемников излучения ФП1 и ФП4 она бы включала удвоенный фазовый сдвиг  $2\Phi$ , а на осевые фотоприемники ФП2 и ФП3, в таком случае, поступали бы интерференционные сигналы только с вкладом  $\Omega(x)$ . Такой подход не является физически справедливым и на практике приводит к значительным отклонениям параметров модуляции итоговых сигналов от ожидаемых. Для конкретной схемы оптического датчика линейных перемещений, если излучение дифрагирует несколько раз, каждый случай требует собственного анализа.

Накапливаемые фазы в каждом из дифракционных порядков физически зависят от пространственных параметров анализирующей шкалы (высота, период, фактор заполнения, геометрическая форма профиля пропускающей дифракционной решетки) и изменяются при различных условиях освещения (длина волны, поляризация, угол падения и др.). Строгий подход к решению задачи дифракции математически описывает преобразование электромагнитного поля и позволяет понять процесс аккумуляции фазы в зоне модуляции дифрак-

ционной решетки [12]. В математической реализации, моды в наборе плоских волн, распространяющихся под разными углами для всех направлений дифракции, складываются на выходе зоны модуляции дифракционной решетки, таким образом формируя значение комплексной амплитуды. Абсолютное значение фазы (как и амплитуды) для каждого дифракционного порядка содержит вклад каждой моды, существующей в рассматриваемом направлении. В свою очередь фаза для каждой моды зависит от входных параметров задачи дифракции: длины волны света, условия поляризации, углов падения и азимута, показателей преломления материалов и пространственных характеристик геометрического профиля.

### 3. Моделирование фазового распределения в оптической схеме

Чтобы сформулировать требования к АШ, в качестве которой используется пропускающая дифракционная решетка, необходимо проанализировать совместное влияние фаз, накапливающихся по ходу распространения каждого светового пучка от источника излучения до плоскости интерференции. Для конкретной схемы датчика, если свет дифрагирует несколько раз, как в нашем случае, каждый случай требует собственного расчета. Расчет оптической схемы интерференционного датчика линейных перемещений, приведенной на рисунке 1, сводится к расчету фазовых сдвигов, вносимых в соответствующие дифракционные порядки решеток с помощью электромагнитной теории дифракции [12–13]. В частности, необходимо рассчитать результирующую фазу света для пары оптических сигналов при линейном перемещении и значения интерференционного контраста, сформированного на каждом фотоприемнике

Численное решение задачи дифракции было проведено в среде Matlab. Для моделирования дифракции на решетке с прямоугольным профилем использован строгий метод RCWA (rigorous coupled-wave analysis) [13]. Для моделирования синусоидальных решеток использован аналогичное программное обеспечение с реализованным методом криволинейных координат, который применяется для анализа структур со сглаженным профилем рельефа [14].

Далее приведено описание исходных данных для расчета. Рассмотрено два случая скрещенных поляризаций (TE и TM). Длина волны падающего излучения соответствует красному полупроводниковому лазеру и составляет 660 нм. Зона модуляции дифракционной решетки выполнена из полиметилметакрилата с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{\text{sub}} = 2,21$ . Пложка дифракционной решетки выполнена из стекла K8 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{\text{gr}} = 2,29$ . Абсолютное значение фазы, накопленной в подложке дифракционной решетки не влияет на результат вычисления разности фаз в силу симметрии оптической схемы. При моделировании были выбраны типовые значения параметров дифракционной решетки, используемых на практике, а именно, периоды АШ в диапазоне от 0,8 до 1,8 мкм высоты профиля рельефа в диапазоне от нулевого значения до 1,8 мкм. Рассматривается синусоидальный рельеф и прямоугольный рельеф с различным фактором заполнения структуры (отношение ширины выступа к периоду).

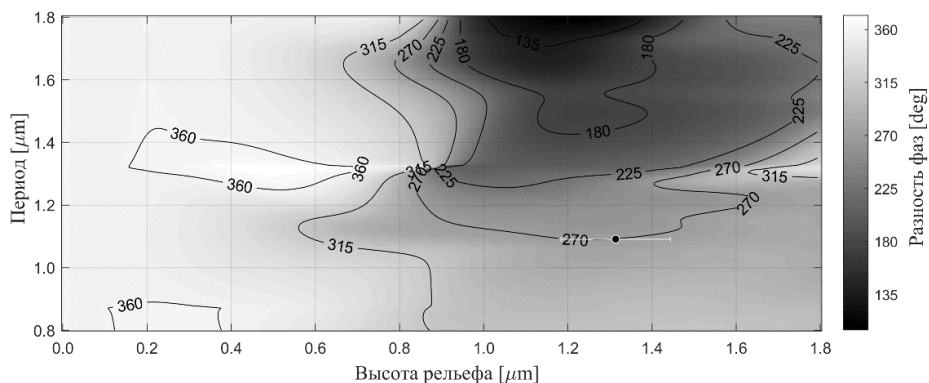


Рис. 2. Итоговая разность фаз для синусоидального профиля дифракционной решетки (АШ), случай ТЕ поляризации

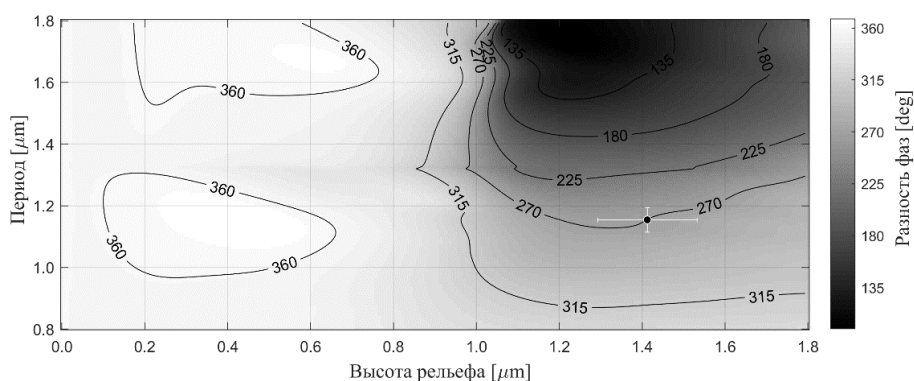


Рис. 3. Итоговая разность фаз для синусоидального профиля дифракционной решетки (АШ), случай ТМ поляризации

Требования для выбора конкретных параметров рельефа пропускающей дифракционной решетки сформированы для удовлетворения задачи квадратурной модуляции. В электронном блоке электрические сигналы, полученные с фотоприемников дискретизируются внутри периода на требуемое количество отсчетов. К примеру, если период кодирующей шкалы составляет  $d = 1$  мкм, то интерференционный период оптического сигнала, поступающего на фотоприемник, составляет  $d/2 = 500$  нм в силу присутствия удвоенной фазовой составляющей  $\Omega$  (рисунок 16). Тогда, если мы хотим добиться погрешности определения перемещения  $\pm 0,5$  нм, нам необходимо провести 1000-кратную интерполяцию. Таким образом, на основе требований высокого разрешения, отклонение расчетной фазы от значения, кратного  $90^\circ$ , не должно превышать  $\pm 0,36^\circ$  или  $\pm 2\pi/1000$  рад, что соответствует тысячной доле периода. Значение интерференционного контраста  $V$  оптических сигналов, поступающих на каждый фотоприемник ниже чем 0,85. Данное значение выбрано для обеспечения глубины модуляции как оптического, так и последующего электрического сигнала. Для анализирующей шкалы также установлены требования по дифракционной эффективности (ДЭ): не ниже 20 %, как в 0-ом, так и в  $\pm 1$ -ых порядках. На практике для тонких рельефно-фазовых решеток, применяемых в качестве измерительных шкал [15], дифракционные эффективности достигают 20–25 %, что ниже теоретического предела [16].

На рисунке 2, 3 приведены контурные диаграммы одинаковой фазы в виде зависимости разности фаз оптических сигналов перемещения  $\Delta\psi_{1-2} = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = \Phi_3 + \Phi_2$  между ФП1 и ФП2 (рисунок 1б) от периода и глубины рельефа пропускающей дифракционной решетки с синусоидальным профилем. Значение разности фаз оптических сигналов перемещения  $\Delta\psi_{3-4}$  между ФП3 и ФП4 по модулю равно  $\Delta\psi_{1-2}$  (но противоположно по знаку), поэтому отдельно не приводится (рисунок 1б). Разности фаз  $\Delta\psi_{3-4}$  между ФП3 и ФП4 всегда составляет  $180^\circ$  из-за симметричности оптической схеме (рисунок 1б).

Рисунки 2 и 3 соответствуют ТЕ и ТМ поляризациям. Значение разности фаз приведено к диапазону от 0 до  $360^\circ$  градусов. Контурными показаны линии разности фаз с шагом  $45^\circ$ . Моделирование показало, что синусоидальный профиль с глубиной менее 800 нм не обеспечивает какого-либо фазового сдвига между результирующими оптическими сигналами (соответственно итоговыми электрическими сигналами). На диаграммах обозначены «черная точка с белой линией», показывающие решения, обеспечивающие описанные выше требования по квадратурной модуляции оптических сигналов и энергетические требования к ним. Для ТЕ поляризации (рисунок 2) решение предоставляет более широкий допуск на высоту профиля рельефа, но малую возможность к варьированию периода. Решение для ТМ поляризации (рисунок 3) соответствует достаточно большому допуску как для высоты профиля, так и для периода.

На рисунках 4–7 приведены аналогичные контурные диаграммы одинаковой фазы в виде зависимости разности фаз  $\Delta\psi_{1-2}$  оптических сигналов между фотоприемниками ФП 1 и ФП 2 от периода и глубины профиля уже для прямоугольного рельефа пропускающей анализирующей шкалы. Рисунки 4 и 5 соответствуют случаям ТЕ и ТМ поляризации для прямоугольного рельефа АШ с фактором заполнения 0,3. Рисунки 6 и 7 иллюстрируют соответственно случаи ТЕ и ТМ поляризации для прямоугольного рельефа АШ с фактором заполнения 0,5. Значение разности фаз приведено к диапазону от  $-180$  до  $180^\circ$ , а контурными показаны линии разности фаз с шагом  $45^\circ$ .

В таблице 1 приведены геометрические параметры АШ и соответствующие энергетические параметры оптической схемы, которые позволяют обеспечить разность фаз, кратную  $90 \pm 0,36^\circ$ . Некоторое сочетание периода и высоты рельефа шкал позволяет выполнить данное условие для каждого из приведенных типов профиля (синусоидального, прямоугольного с факторами заполнения 0,3 и 0,5) и получить стабильные оптические сигналы. Изменение геометрической формы профиля позволяет добиться технологически более простого в реализации сочетания периода и высоты профиля рельефа [17]. Для энергетической оценки приведены значения интерференционного контраста, а также суммарная дифракционная эффективность (ДЭ) для оптических сигналов, поступивших на приемники ФП1 и ФП2 (рисунок 1).

Моделирование показало необходимость изготовления относительно «глубокого» рельефа, по высоте профиля превышающего значение периода. Глубина профиля может превышать ширину выступав в три раза, что технологически вполне реализуемо, хоть и может по-

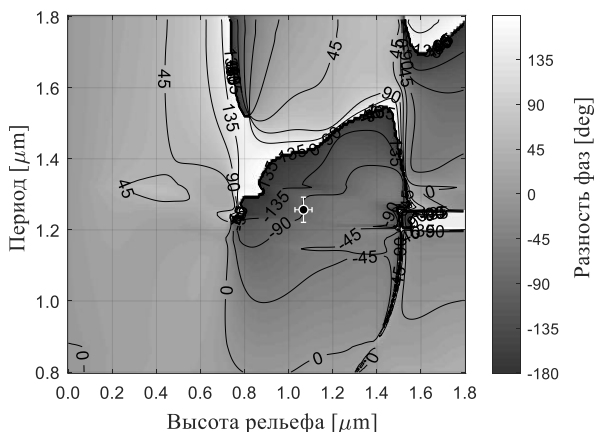


Рис. 4. Итоговая разность фаз для прямоугольного профиля с фактором заполнения 0,3, случай ТЕ поляризации

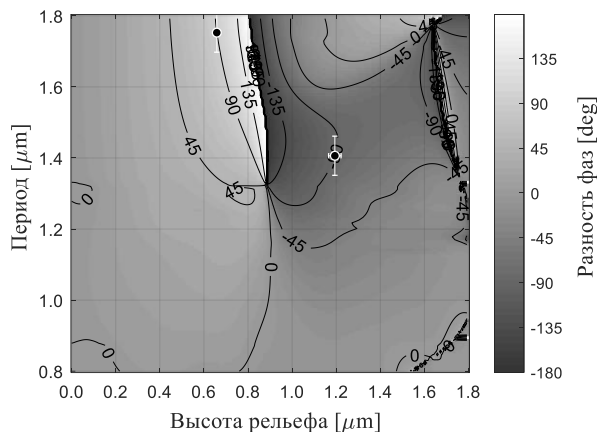


Рис. 5. Итоговая разность фаз для прямоугольного профиля с фактором заполнения 0,3, случай ТМ поляризации

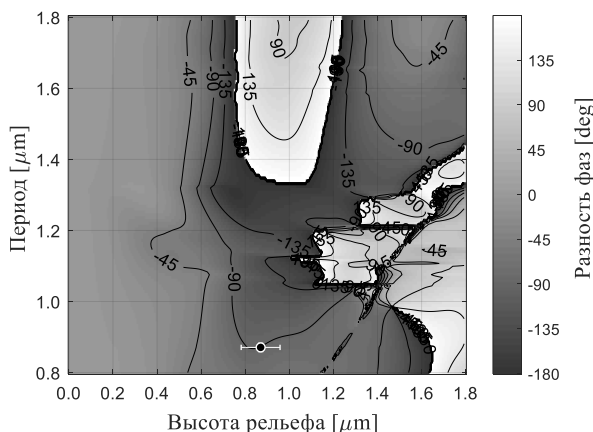


Рис. 6. Итоговая разность фаз для прямоугольного профиля с фактором заполнения 0,5, случай ТЕ поляризации

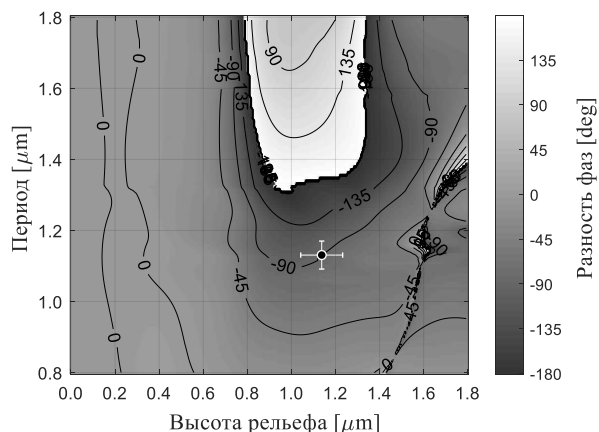


Рис. 7. Итоговая разность фаз для прямоугольного профиля с фактором заполнения 0,5, случай ТМ поляризации

влекать некоторые технологические сложности при изготовлении. Для прямоугольного профиля рельефа с фактором заполнения 0,3 отдельно приведены параметры для реализации квадратурной модуляции оптических сигналов, когда высота профиля значительно меньше периода. В этом случае, наблюдается падение интерференционного контраста на боковом фотоприемнике и уменьшение эффективности потока излучения, приходящего на осевой фотоприемник.

Необходимо отметить, что приведенные отклонения для периода и высоты профиля, представленные в таблице 1, позволяют обеспечить требуемое значение разности фаз, а не являются технологическими допусками на изготовление. При создании датчиков линейных перемещений важную роль играет постоянство значения периода в пределах всей рабочей зоны шкал. От значения периода напрямую зависит период гармонических квадратурных сигналов перемещения, а, следовательно, и разрешение датчика. Непостоянство периода мо-



Таблица 1. Рассчитанные параметры анализирующей шкалы для формирования квадратурных сигналов

Тип профиля рельефа	Поляризация	Разность фаз $\Delta\Psi_{1-2}$ (или $-\Delta\Psi_{3-4}$ ), град	ДЭ		Контраст на ФП 1	Контраст на ФП 2	Период, нм	Высота профиля, нм				
			для ФП 1	для ФП 2								
Синусоидальный	TE	270±0,36	0,099	0,176	0,952	1,000	1091±12	1314±130				
	TM		0,121	0,185					0,921	1,000	1154±40	1412±120
Прямоугольный с фактором заполнения 0,3	TE	-90±0,36	0,122	0,184	0,984	1,000	1257±35	1067±38				
	TM		0,123	0,173					0,911	1,000	1406±55	1194±28
	TM		90±0,36	0,118					0,087	0,712	1,000	1753±55
Прямоугольный с фактором заполнения 0,5	TE	-90±0,36	0,119	0,229	0,999	1,000	871±12	870±88				
	TM		0,113	0,211					0,977	1,000	1131±39	1138±95

жет привести к нарушению геометрии хода лучей и соответствующему смещению интерференционной полосы в плоскости фотоприемников. Для конкретного датчика линейных перемещений после выбора величины периода, в соответствии с расчетами устанавливается допуск на изменение глубины профиля рельефа.

Сдвиг фазы, приобретаемый при каждой дифракции в схеме, чувствителен к поляризации. Для подобранных параметров анализирующей шкалы, одно и то же значение разности фаз для скрещенных поляризаций обеспечивается при различии глубины профиля рельефа более чем на 100–200 нм. Аналогичный вывод справедлив и для значений периода. Например, для прямоугольного профиля с фактором заполнения 0,3 разность рассчитанные высоты для разных поляризаций различаются на 127 нм, а периоды на 149 нм. Выбор параметров дифракционной решетки, функционирующей как устройство внесения фазового сдвига, возможен и независимо от поляризации. Но подобное решение будет сопровождаться как снижением дифракционной эффективности, так и отклонением вносимого фазового сдвига. На практике мы рекомендуем использовать TE поляризацию. В таком случае, вектор напряженности электрического поля колеблется согласно направлениям штрихов дифракционной решетки и не претерпевает поворота. Использование TM поляризации требует дополнительного исследования поляризационных свойств анализирующей шкалы [18].

#### 4. Заключение

Проектирование высокоточных интерференционных датчиков линейных перемещений требует проведения как анализа фазовых соотношений для каждого из интерферирующих пучков, так и энергетического расчета оптической системы. Применение в качестве анализирующей шкалы дифракционной решетки, изготовленной только в соответствии с требованиями деления пучка, влечет за собой формирование случайного соотношения фаз. Это, в свою оче-

редь, может привести к невозможности создания квадратурной модуляции оптических сигналов. Представленный в статье анализ позволяет реализовать стабильную квадратурную разность фаз в схеме интерференционного датчика линейных перемещений, не зависящий от сложной юстировки оптической схемы. Результаты расчета показывают, что для создания разности фаз с высокой стабильностью можно использовать достаточно широкий допуск на высоту профиля рельефа.

Рельефно-фазовые дифракционные решетки обеспечивают внесение фазового сдвига в одном направлении дифракции относительно другого. Представлены параметры анализирующей шкалы и соответствующие энергетические параметры оптической схемы, которые позволяют обеспечить стабильную разность фаз, кратную  $90^\circ$ , с погрешностью не более  $\pm 0,36^\circ$ , что достаточно для обеспечения работоспособности датчика с нанометрическим разрешением. Приводятся данные по соотношению периода и высоты для каждого из приведенных типов синусоидального и прямоугольного профиля с факторами заполнения 0,3 и 0,5 анализирующей дифракционной решетки.

### Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (Проект № 18-79-00304).

### Список источников

- [1] **Ly, Q.** Simple and compact grating-based heterodyne interferometer with the Littrow configuration for high-accuracy and long-range measurement of two-dimensional displacement / Q. Ly, Z. Liu, W. Wang, X. Li, S. Li, Y. Song, H. Yu, W. Li // *Appl. Opt.* — 2018. — Vol. 57. — № 31. — P. 9455. — DOI:10.1364/AO.57.009455.
- [2] **Hausotte, T.** Interference signal demodulation for nanopositioning and nanomeasuring machines / T. Hausotte, B. Percle, U. Gerhardt, D. Dontsov, E. Manske, G. Jager // *Meas. Sci. Technol.* — 2012. — Vol. 23. — P. 074004. — DOI:10.1088/0957-0233/23/7/074004.
- [3] **Lee, J.-Y.** Displacement measurement using a wavelength-phase-shifting grating interferometer / J.-Y. Lee, G.-A. Jiang // *Opt. Exp.* — 2013. — Vol. 21. — № 21. — P. 25553. — DOI:10.1364/OE.21.025553.
- [4] **Комоцкий, В. А.** Исследование датчика линейных перемещений на основе двухфазовых дифракционных решеток / В. А. Комоцкий, В. И. Корольков, Ю. М. Соколов // *Автоматрия.* — 2006. — Том 42. — № 6. — С. 105–112.
- [5] **Jourlin, Y.** Compact diffractive interferometric displacement sensor in reflection // Y. Jourlin, J. Jay, O. Parriaux // *Prec. Engineering.* — 2002. — Vol. 26. — P. 1–6.
- [6] **Ye, G.** / G. Ye, S. Fan, H. Liu, X. Li, H. Yu, Y. Shi, L. Yin, B. Lu // *Meas. Sci. Technol.* — 2014. — V. 25. — P. 125003. — DOI:10.1088/0957-0233/25/12/125003.
- [7] **Yaqoob, Z.** Harmonically-related diffraction gratings-based interferometer for quadrature phase measurements / Z. Yaqoob, J. Wu, X. Cui, X. Heng, C. Yang // *Opt. Express.* — 2006. — Vol. 14. P. 8127.
- [8] **Teimel, A.** Technology and applications of grating interferometers in high-precision measurement / A. Teimel // *Precis. Engineering.* — 1992. — Vol. 4. — P. 147154.
- [9] **Шишова, М. В.** Математическое моделирование процесса передачи сигнала в оптической системе датчика линейных перемещений / М. В. Шишова, С. Б. Одинокоев, Д. С. Лушников, А. Ю. Жердев, О. А. Гурылев // III международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии»: Сборник трудов. Самара. — 2017. — С. 1438.

- [10] **Вишняков, Г. Н.** Метод измерения фазового сдвига на основе Фурье-анализа разностных интерферограмм / Г. Н. Вишняков, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев // Оптика и спектроскопия. — 2015. — Том 118. — № 6. — С. 1005. — DOI:10.7868/S0030403415060240.
- [11] **Cordeiro, C. M. B.** Measurement of phase differences between the diffracted orders of deep relief gratings / C. M. B. Cordeiro, L. Cescato, A. A. Freschi, Li Lifeng // Opt. Lett. — 2003. — Vol. 28. — № 9. — P. 683. — DOI:10.1364/OL.28.000683.
- [12] **Clausnitzer, T.** Highly-dispersive dielectric transmission gratings with 100 % diffraction efficiency T. Clausnitzer, T. Kämpfe, E.-B. Kley, A. Tünnermann, A. V. Tishchenko, O. Parriaux // Opt. Express. — 2008. — Vol. 16. — № 8. — P. 5577. — DOI:10.1364/OE.16.005577.
- [13] **Moharam, M. G.** Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings / M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet, T. K. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. A. — 1995. — Vol. 12. — № 5. — P. 1068. — DOI:10.1364/JOSAA.12.001068.
- [14] **Chandezon, J.** A new theoretical method for diffraction gratings and its numerical application / J. Chandezon, D. Maystre, G. Raoult // J. Optics (Paris). — 1980. — Vol. 11. — P. 235.
- [15] **Шишова, М. В.** Методы анализа качества дифракционных решеток для датчиков линейного перемещения / М. В. Шишова, С. Б. Одинокоев, Д. С. Лушников, А. Ю. Жердев // Опт. журнал. — 2018. — Том 85. — № 7. — DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-07-27-32.
- [16] **Хорохоров, А. М.** Исследование влияния параметров фазовых дифракционных решеток на распределение интенсивности дифрагированного света при формировании цветокодированных изображений / А. М. Хорохоров, А. М. Клищук, И. К. Цыганов, С. Б. Одинокоев, А. Ф. Ширанков // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. — 2005. — Том 61. — № 4. — С. 13–26.
- [17] **Аксенов, В. П.** Формирование оптических вихрей с помощью голограмм с асимметричным профилем штриха / В. П. Аксенов, В. Ю. Венедиктов, А. А. Севрюгин, И. М. Турсунов // Опт. и спектр. — 2018. — Том 124. — № 2. — С. 275.
- [18] **Azzam, R. M. A.** Polarization characteristics of scattered radiation from a diffraction grating by ellipsometry with application to surface roughness / R. M. A. Azzam, N. M. Bashara // Physical Review B. — 1972. — Vol. 5. — № 12. — P. 4721.