

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКА
МАЛЫХ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ДВУХ ФАЗОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК**

В. А. Комоцкий, В. И. Корольков, Ю. М. Соколов

Российский университет дружбы народов, Москва

E-mail: vkomotskii@sci.pfu.edu.ru

Предложен и исследован усовершенствованный оптоэлектронный датчик малых линейных перемещений на основе дифракции лазерного пучка на двух фазовых дифракционных решетках. Показана возможность удвоения области линейности при регистрации сигналов в двух первых дифракционных порядках. На основе этого датчика сконструирован макет измерителя неровностей поверхности и проведены эксперименты по измерению профилей поверхности рельефных структур.

Введение. Взаимодействие лазерного пучка с системой из двух фазовых дифракционных решеток с одинаковым периодом Λ , расположенных на расстоянии ℓ_z друг от друга, исследовалось в [1, 2]. В работе [3] описан датчик линейных перемещений, в котором пучок лазерного излучения последовательно проходит через две близко расположенные дифракционные решетки, одна из которых неподвижна, а другая может перемещаться относительно первой в направлении оси Ox , т. е. поперек штрихов решетки. В полученной дифракционной картине выделяется один из первых дифракционных порядков и направляется на фотодетектор. Если в схеме применяются фазовые дифракционные решетки, имеющие прямоугольную форму в виде меандра, зависимости интенсивностей первых дифракционных порядков $I_{\pm 1}(x)$ от перемещения одной из решеток относительно другой вдоль оси Ox имеют гармонический характер с периодом Λ [1, 2]. Линейный участок зависимости $I_{\pm 1}(x)$ используется для преобразования величины смещения одной из решеток в величину напряжения сигнала на выходе фотодетектора, помещенного в один из первых дифракционных порядков.

В данной работе рассматривается усовершенствованный датчик, который по сравнению с конструкцией, описанной в [3], обладает рядом преимуществ. В предлагаемом варианте можно сделать датчик более жестким, избежать перекосов одной решетки относительно другой, уменьшить количество переотражений света от различных плоскостей оптической системы и вдвое увеличить диапазон линейности.

**Свойства системы из двух фазовых дифракционных решеток.
Основные расчетные соотношения.** В качестве элементов датчика малых

перемещений будем использовать фазовые решетки, образованные рельефом на стекле в виде чередующихся полос выступов и впадин прямоугольной формы. Ширина выступов равна ширине впадин. Таким образом, профили решеток имеют форму меандра. При просвечивании такой решетки лазерным пучком с плоским волновым фронтом по нормали к ее поверхности образуется пространственная фазовая модуляция (ПФМ) в форме меандра с амплитудой $\Phi_M = \Delta\varphi/2 = \pi h(n-1)/\lambda$ (здесь h – глубина рельефа, n – показатель преломления материала подложки, λ – длина волны лазерного излучения, $\Delta\varphi$ – разность фаз между двумя лучами, проходящими через выступ и впадину). Ввиду того что в пространственных спектрах решеток, имеющих форму меандра, четные порядки отсутствуют, выражения, описывающие зависимости интенсивностей первых порядков $I_{\pm 1}(x)$ от перемещения одной из решеток вдоль оси Ox , принимают вид [1, 2]

$$I_{\pm 1}(x) = \frac{2}{\pi^2} + \frac{2}{\pi^2} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} x \mp L\right). \quad (1)$$

Здесь $L = \pi\lambda\ell_z/\Lambda^2$ – безразмерный параметр расстояния, а интенсивность падающей оптической волны принята равной единице. Глубина ПФМ принята для обеих решеток равной: $\Phi_M = \Phi_{M1} = \Phi_{M2} = \pi/4$, так как именно в этом случае достигается максимальное значение амплитуды переменной составляющей в зависимостях $I_{\pm 1}(x)$. Следует отметить, что формула (1) не учитывает расходимость оптического зондирующего пучка, ее учет приводит к тому, что амплитуда переменной составляющей будет уменьшаться при увеличении расстояния между решетками ℓ_z [2].

Графики зависимостей $I_{\pm 1}(x)$ при разных значениях L приведены на рис. 1, $a-c$. На этих зависимостях можно выделить линейные участки, на которых в определенном диапазоне смещений реализуется режим линейного преобразования изменений координат в изменения интенсивности. Величину области линейности можно приблизительно оценить исходя из допустимой величины ε отклонения синусоиды от прямой линии, используя формулу

$$H_{\max} \cong \frac{\Lambda}{\pi} \sqrt{6\varepsilon} \quad [4].$$

Приведем некоторые оценки. При $\varepsilon = 1\%$ $H_{\max} = 0,078\Lambda$; при $\varepsilon = 5\%$ $H_{\max} = 0,174\Lambda$; при $\varepsilon = 10\%$ $H_{\max} = 0,247\Lambda$. Крутизна изменения величины интенсивности в зависимости от перемещения имеет максимальное значение на линейных участках характеристик $I_{\pm 1}(x)$:

$$S_{x \max} = \left| \frac{dI_{\pm 1}}{dx} \right|_{\max} = \frac{4}{\pi\Lambda}.$$

Сравнивая зависимости $I_{+1}(x)$ и $I_{-1}(x)$, можно заметить, что параметр расстояния L входит в аргументы косинусов с разными знаками, поэтому при изменении расстояния ℓ_z между решетками эти зависимости получают противоположные фазовые сдвиги: график $I_{+1}(x)$ смещается вправо, а график $I_{-1}(x)$ – влево по оси Ox , что иллюстрирует рис. 1, $a-c$.

На этих же графиках показаны расчетные зависимости интенсивности нулевого дифракционного порядка от смещения одной из решеток относительно другой в направлении Ox . Выражение, описывающее зависимость $I_0(x)$, приведено в [1]. Оно содержит сумму множества гармоник с пространственными частотами, кратными Λ^{-1} . При расчете и построении графиков $I_0(x)$ учитывались девять низших гармоник. Как видно из рис. 1, графики за-

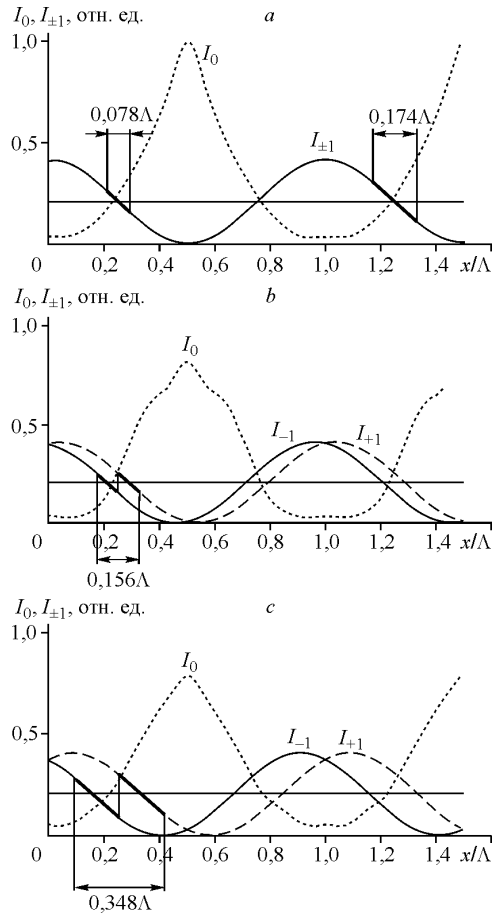


Рис. 1. Зависимости $I_{\pm 1}(x)$ и $I_0(x)$ от разных значений параметра L : $L = 0$ (a); $L = 0,078\pi$, $\varepsilon_1 = 1\%$ (b); $L = 0,174\pi$, $\varepsilon_2 = 5\%$ (c). Удвоенные области линейности показаны для двух значений ε

зависимостей $I_0(x)$ также имеют участки, близкие к линейным, однако эти графики сильно меняют свою форму при изменении расстояния ℓ_z между решетками, что несколько затрудняет использование сигнала в нулевом порядке дифракции в измерительной схеме.

Линейные области зависимостей $I_{+1}(x)$ и $I_{-1}(x)$ на рис. 1, b, c смещены относительно друг друга. Увеличение диапазона линейности вдвое возможно, если осуществить сопряжение линейных участков, т. е. конец первого участка линейности совместить с началом второго участка. На практике этот принцип можно реализовать, используя двухканальную схему измерений, в которой два фотодетектора располагаются в первых порядках (+1 и -1). При этом следует выбрать расстояние между решетками ℓ_z таким, чтобы графики $I_{+1}(x)$ и $I_{-1}(x)$ были смещены относительно друг друга на величину линейного участка, а в схеме обработки можно было использовать сигналы с выходов обоих фотодетекторов. При выходе рабочей точки из диапазона линейности первого канала показания запоминаются и производится переключение схемы обработки сигнала на выход второго канала. На рис. 1, b, c представлены примеры удвоения линейной области при $\varepsilon_1 = 1\%$ и $\varepsilon_2 = 5\%$.

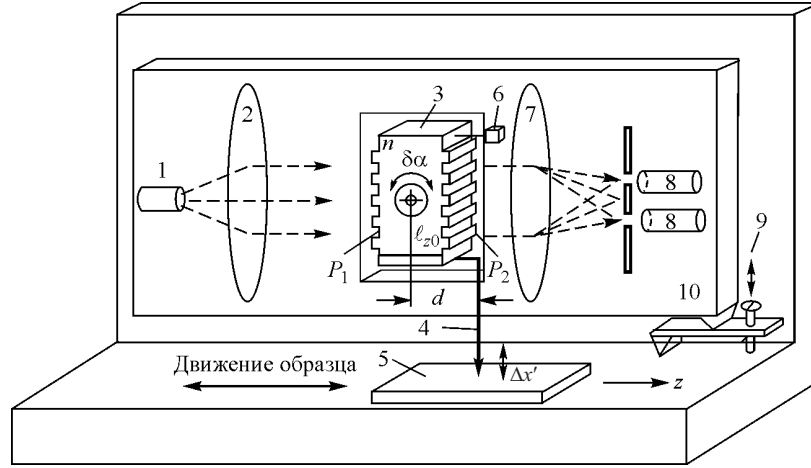


Рис. 2. Схема экспериментального макета малых перемещений на основе оптоэлектронного датчика: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – коллиматор, 3 – оптоэлектронный датчик, 4 – щуп, 5 – перемещаемый столик с образцом, 6 – грузик на коромысле, 7 – линза, 8 – фотодетекторы, 9 – микрометрический винт настройки начального положения датчика, 10 – платформа

Из формулы (1) следует, что взаимное расположение кривых $I_{+1}(x)$ и $I_{-1}(x)$ повторяется периодически при изменении параметра L на величину $\pi, 2\pi, 3\pi, \dots$, что соответствует увеличению расстояния между решетками на $\Delta l_z = \Lambda^2/\lambda, \Delta l_z = 2\Lambda^2/\lambda, \Delta l_z = 3\Lambda^2/\lambda, \dots$. Таким образом, можно было бы располагать решетки на любом расстоянии, удовлетворяющем условию $l_{zk} = l_{z0} + k\Lambda^2/\lambda$, где k – целое число, l_{z0} – минимальное расстояние, при котором обеспечивается удвоение участка линейности с заданной величиной ε . Однако на практике не следует располагать решетки слишком далеко друг от друга, так как при увеличении расстояния l_z амплитуда переменной составляющей $I_{\pm 1}(x)$ уменьшается вследствие расходимости оптического пучка. Оценку допустимого расстояния l_z можно дать на основе соотношений, приведенных в [2].

Устройство усовершенствованного датчика (рис. 2). Основным элементом конструкции является стеклянный параллелепипед, на гранях которого размещены с одинаковым периодом две фазовые дифракционные решетки P_1 и P_2 с профилем в виде меандра. Штрихи решеток P_1 и P_2 параллельны друг другу. Блок решеток закрепляется на оси. Поворот блока на угол $\delta\alpha$ эквивалентен смещению решеток Δx относительно друг друга на величину

$$\Delta x = \frac{\delta\alpha l_{z0}}{n}. \quad (2)$$

Если блок решеток связан со щупом, который образует плечо длиной d относительно оси, то при перемещении щупа на $\Delta x'$ имеем $\delta\alpha \cong \Delta x'/d$. Тогда

$$\Delta x = \frac{l_{z0}}{nd} \Delta x'. \quad (3)$$

Увеличение плеча d уменьшает чувствительность датчика, но вместе с тем возрастает протяженность линейного участка $\Delta x'$ в d/ℓ_{z0} раз и снижается усилие на щупе, необходимое для поворота датчика относительно его оси. Размер параллелепипеда ℓ_{z0} выбирается из условия удвоения диапазона линейности при заданной величине ε . При расчете ℓ_{z0} необходимо учитывать, что промежуток между решетками заполнен средой с показателем преломления $n > 1$, в которой длина волны света $\lambda' = \lambda/n$. При этом параметр $L = \pi\lambda\ell_{z0}/n\Lambda^2$ и, следовательно, формула для расчета размера параллелепипеда будет следующей:

$$\ell_{z0} = n\Lambda^2 L / \pi\lambda.$$

Аналогично запишется формула для ℓ_{zk} :

$$\ell_{zk} = \ell_{z0} + k(n\Lambda^2/\lambda).$$

Значения ℓ_{z0} и $\ell_{z1} = \ell_{z0} + n\Lambda^2/\lambda$ (при $k=1$) для трех значений ε приведены в таблице.

Предложенная конструкция датчика является более жесткой, чем конструкция с отдельными решетками на упругих подвесах, что позволяет избежать перекосов решеток. Датчик может быть легко уравновешен относительно оси вращения, и статическое давление щупа на поверхность, регулируемое положением грузика, может быть весьма малым. При проведении измерений давление регулировалось в пределах $(5-50) \cdot 10^{-3} H$. Кроме того, в данной конструкции уменьшено количество отражающих поверхностей, что снижает возможность возникновения помех из-за переотражений.

Экспериментальный макет измерителя малых перемещений. Схема макета, построенная с применением усовершенствованного датчика, показана на рис. 2. Блок решеток связан со щупом, который вводится в контакт с образцом. Образец может перемещаться вдоль оси Oz с помощью микрометрического винта, связанного с микродвигателем. Необходимое усилие на щупе регулируется положением грузика на коромысле. Для установки рабочей точки на середину линейного участка в конструкции предусмотрена простая и удобная система настройки: лазер и фотодетекторы установлены на отдельной платформе, которую можно поворачивать относительно блока решеток. Перед началом измерений эту платформу поворачивают с помощью

**Расчетные значения $L, H_{\max}, \ell_{z0}, \ell_{z1}$,
для которых происходит удвоение области линейности при заданной величине ε
($n = 1,51, \Lambda = 200$ мкм ($\Lambda = 100$ мкм))**

$\varepsilon, \%$	L	$H_{\max}, \text{мкм}$	$\ell_{z0}, \text{мм}$	$\ell_{z1}, \text{мм}$
1	$0,078\pi$	15,6 (7,8)	7,3 (1,8)	100,2 (25,1)
5	$0,174\pi$	34,8 (17,4)	16,2 (4,1)	109,1 (27,3)
10	$0,247\pi$	49,4 (24,7)	22,9 (5,7)	115,9 (29,0)

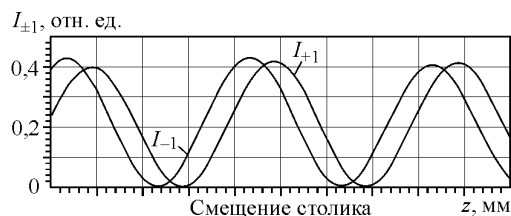


Рис. 3. Графики изменения интенсивностей первых дифракционных порядков при движении щупа по гладкой наклонной плоскости

микрометрического винта, что эквивалентно повороту блока решеток относительно луча лазера. По показаниям вольтметра на выходе фотодетектора устанавливают положение на линейном участке. Аналоговые сигналы с выходов фотодетекторов преобразовывались с помощью 16-разрядного АЦП и программно обрабатывались с применением технологии LabVIEW. Результаты измерений отображались на экране монитора и сохранялись в специальном файле-отчете [5]. В установке использовались: полупроводниковый лазерный модуль S-9 со встроенным коллиматором (длина волны излучения $\lambda = 0,65$ мкм, мощность 5 мВт), два фотодетектора ФД-256, электропривод, который обеспечивал равномерное перемещение образца со скоростью 47 мкм/с вдоль оси Oz . Параметры используемого датчика: $\ell_{z0} = 13$ мм, $n = 1,51$, $\Lambda = 200$ мкм, $d = 16$ мм.

В серии экспериментов проводились измерения выходного сигнала во время движения щупа по гладкой наклонной плоскости и проверялась форма зависимостей $I_{\pm 1}(x)$. При смещении столика с образцом вдоль оси Oz на величину Δz происходило равномерное смещение щупа и соответственно одной из решеток в вертикальном направлении по оси Ox на величину $\Delta x = \beta \Delta z$, где β – угол наклона опорной плоскости, по которой скользит щуп. При этом на выходах фотодетекторов, помещенных в первых порядках, получили зависимости изменения выходного сигнала, период которых соответствовал периоду решеток. Как видно из рис. 3, графики экспериментальных зависимостей $I_{\pm 1}(x)$ близки к гармоническим и сдвинуты относительно друг друга. Величина удвоенного диапазона линейности блока при эквивалентном смещении вдоль оси Ox составила 50 мкм при $\epsilon = 2,6\%$, а с учетом отношения $d/\ell_{z0} = 1,23$ диапазон линейности равен 62 мкм.

Проведена также серия экспериментов по измерению профилей поверхности. В качестве объектов были использованы рельефные структуры с прямоугольным профилем в виде меандра. На рис. 4 показан график зависимости выходного напряжения от перемещения образца с рельефной структурой поверхности с периодом $\Lambda = 200$ мкм и глубиной рельефа порядка 0,2 мкм. Крутизна зависимости напряжения на выходе схемы от перемещения щупа составила $S_x = 0,075$ В/мкм. Приведем некоторые данные, оценивающие потенциальную и реальную чувствительность датчика. При полосе пропускания измерительного канала $B = 40$ Гц и резисторе нагрузки $R_n = 39$ кОм в цепи преобразователя ток–напряжение имеем следующие величины среднеквадратических составляющих шумов: тепловые шумы нагрузки $\sqrt{u_{\text{шн}}^2} = 1,6 \cdot 10^{-7}$ В, дробовые шумы фототока $\sqrt{u_{\text{шд}}^2} = 6,1 \cdot 10^{-7}$ В и шумы операцион-

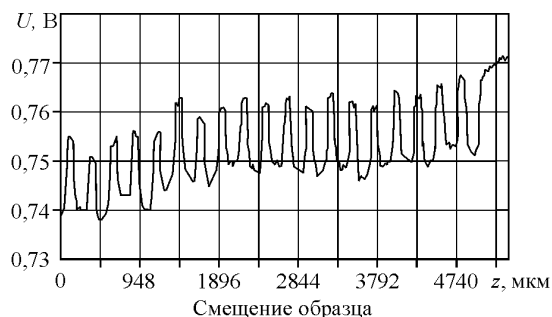


Рис. 4. Результаты измерения профиля рельефа глубиной порядка 0,2 мкм

ного усилителя $\sqrt{\overline{u_{\text{ШУ}}^2}} = 3,0 \cdot 10^{-7}$ В. Ошибки, обусловленные применением 16-разрядного АЦП, оцениваются величиной $\sqrt{\overline{u_{\text{ША}}^2}} = 3,1 \cdot 10^{-4}$ В и в данном случае существенно превышают собственные шумы аналоговой части оптоэлектронного датчика. Был измерен среднеквадратический уровень флуктуаций на выходе канала АЦП при условии, что щуп зафиксирован на неподвижном образце. Он составил $6 \cdot 10^{-4}$ В. Таким образом, с учетом измеренной крутизны преобразования $S_x = 0,075$ В/мкм реальную чувствительность макета с 16-разрядным АЦП можно оценить величиной порядка 0,008 мкм. При движении образца измеренный уровень флуктуаций был выше и соответствующая оценка флуктуаций составила 0,02 мкм. В этом случае уровень флуктуаций был увеличен за счет сейсмических шумов привода и неоднородностей поверхности образца. Следует заметить, что потенциальная чувствительность датчика, рассчитанная с учетом собственных шумов датчика на аналоговом выходе, имеет величину порядка $0,15 \cdot 10^{-4}$ мкм.

Заключение. В данной работе предложена усовершенствованная конструкция датчика малых линейных перемещений на основе стеклянного параллелепипеда с нанесенными на его грани фазовыми дифракционными решетками и построен макет измерителя малых перемещений с простой системой настройки на линейный участок. Такая конструкция обладает рядом преимуществ: отсутствие перекосов решеток, удобство настройки, увеличенный диапазон линейности. Объем датчика составляет менее 1 см^3 , поэтому его масса и момент инерции невелики. Сила давления щупа, оказываемая на поверхность образца, регулируется с помощью грузиков на коромысле и может быть очень малой. Датчик имеет перспективу использования, так как потенциальная чувствительность, обусловленная его собственными шумами, значительно превышает чувствительность типовых серийно выпускаемых датчиков. Диапазон линейности датчика может быть увеличен за счет увеличения плеча. При этом уменьшается чувствительность датчика. Однако во многих случаях максимально достижимое значение чувствительности является избыточным. Предложенный датчик и измерительное устройство [6] могут найти применение при построении профилометров, деформометров и других устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ниибизи А., Комоцкий В. А.** Теоретический анализ взаимодействия оптической волны с системой пространственно разделенных периодических решеток. М.: ВИНТИ, 1985. № 661–В86. С. 33.
2. **Комоцкий В. А., Никулин В. Ф.** Теоретический анализ дифракции гауссова оптического пучка на системе из двух дифракционных решеток // Оптика и спектроскопия. 1987. Вып. 2. С. 409.
3. **Комоцкий В. А., Никулин В. Ф.** Дифракционный измеритель малых перемещений и вибраций // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля». Могилев, 1989. Ч. 2. С. 99.
4. **Ниибизи А., Комоцкий В. А.** Характеристики оптической схемы из двух дифракционных решеток при измерении вибраций. М.: ВИНТИ, 1988. № 9096–В88.
5. **Комоцкий В. А., Корольков В. И., Соколов Ю. М.** Исследование датчика перемещений на основе двух фазовых дифракционных решеток // Междунар. науч.-практич. конф. «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments». М.: Изд-во РУДН, 2003. С. 142.
6. **Пат. № 2277695 РФ.** Устройство для измерения малых линейных перемещений /В. А. Комоцкий, В. И. Корольков. Заявл. 6.12.2004; Оpubл. 10.06.2006, Бюл. № 16.

Поступила в редакцию 30 ноября 2005 г.