

КОНТРОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, РАССЕЯННОГО ДИФРАКЦИОННОЙ СТРУКТУРОЙ

Д.А. Белоусов, А.Г. Полещук, В.Н. Хомутов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация

Представлены результаты разработки и исследования метода и устройства для оперативного контроля пространственного распределения интенсивности дифракционных порядков в телесном угле дифракции до $\pm 80^\circ$ и 360° по азимуту как на проход, так и на отражение. Разработанное устройство предназначено для контроля формы и глубины микрорельефа дифракционных оптических элементов в процессе производства.

Ключевые слова: дифракционная оптика, компьютерная оптика, ДОЭ, синтезированные голограммы, измерительная система.

Цитирование: Белоусов, Д.А. Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой / Д.А. Белоусов, А.Г. Полещук, В.Н. Хомутов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 678-686. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-678-686.

Введение

Оптическое излучение, прошедшее через квазипериодическую структуру поверхности дифракционно-оптического элемента (ДОЭ) или отражённое от неё, может быть описано индикатрисой рассеяния, которая представляет собой разложение падающего излучения в угловой спектр на ряд дифракционных порядков (ДП). Угловое распределение ДП и их интенсивности зависят от параметров микрорельефа исследуемого элемента [1]. Таким образом, проанализировав пространственное распределение (ПР) ДП, можно оперативно определить параметры структуры профиля ДОЭ по всей его площади [2, 3].

Автоматические установки, основанные на последовательном сканировании ПР ДП светочувствительным датчиком, описаны в работах [4, 5]. Преимуществом таких установок являются простота конструкции и широкий динамический диапазон фоточувствительного датчика. К другому типу относятся установки, использующие для регистрации ПР ДП светочувствительные матрицы (видеокамеры) [6, 7]. Использование видеокамеры позволяет выявить особенности ПР, а также осуществлять контроль ПР ДП с гораздо более высокой скоростью по сравнению со сканирующими устройствами. Однако падающее излучение разлагается на структуре ДОЭ в широкий угловой спектр, и часть ДП не может быть зафиксирована видеокамерой в связи с тем, что индикатриса рассеяния в таком случае не направлена в сторону светочувствительной матрицы. Частично эту проблему решили авторы в работе [8], предложив использовать плоский рассеивающий экран, что позволяет производить измерение в телесном угле дифракции порядка $\alpha \leq \pm 60^\circ$ для ДОЭ, работающих на пропускание падающего излучения. Однако такого диапазона углов часто бывает недостаточно. К тому же на сегодняшний день не известно методов измерения ПР ДП отражённого излучения в широком телесном угле дифракции.

В данной работе представлены результаты разработки и исследования установки для контроля ПР ДП в телесном угле дифракции $\alpha \leq \pm 80^\circ$ и по азимуту

360° для ДОЭ, работающих как на пропускание, так и на отражение падающего излучения.

1. Метод расширения диапазона телесных углов дифракции, регистрируемого видеокамерой

При дифракции падающего излучения на микрорельефе ДОЭ нулевой порядок распространяется вдоль оптической оси, а высшие порядки отклоняются на углы:

$$\alpha = \arcsin(m\lambda/S), \quad (1)$$

где m – номер ДП, λ – длина волны падающего излучения, S – период микрорельефа ДОЭ. Из выражения (1) следует, что чем выше номер ДП, тем больше он отклоняется от оптической оси.

Использование рассеивающего экрана, расположенного между исследуемым ДОЭ и видеокамерой с проекционным объективом, позволяет направить часть дифрагированного излучения в сторону светочувствительной матрицы. Это даёт возможность расширить телесный угол дифракции, регистрируемый видеокамерой.

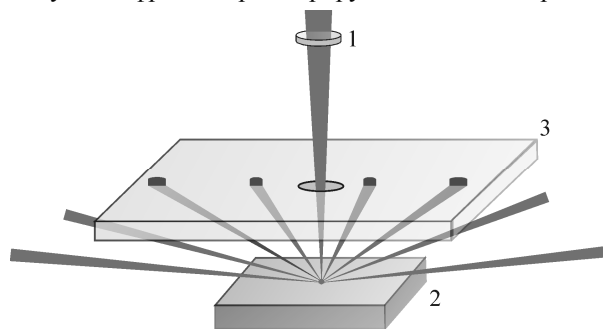


Рис. 1. Использование плоского рассеивающего экрана для увеличения телесного угла регистрируемых видеокамерой ДП. 1 – фокусирующий объектив, 2 – исследуемый образец, 3 – плоский рассеивающий экран

При использовании плоского рассеивающего экрана (рис. 1) оптический путь, пройденный ДП от исследуемого элемента до экрана, зависит от угла дифракции. Так, например, ДП, отклонившийся на угол α от оптической оси, пройдёт в M раз больше расстояние до рассеивающего экрана, чем нулевой ДП, где:

$$M = 1/\cos(\alpha). \tag{2}$$

Таким образом, с увеличением угла дифракции ДП на поверхности плоского рассеивающего экрана увеличиваются в размерах (рис. 2) и принимают форму эллипса.

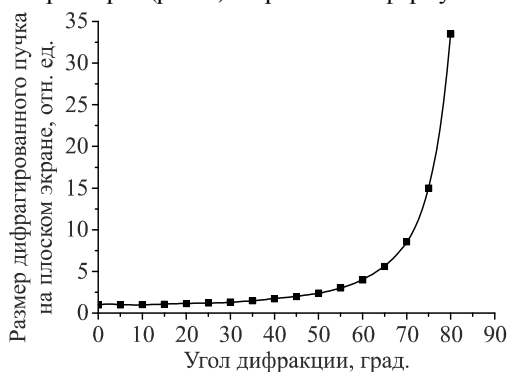


Рис. 2. Размер ДП на поверхности плоского рассеивающего экрана в зависимости от угла дифракции

Учитывая, что потери, связанные с отражением излучения от поверхности плоского рассеивающего экрана, увеличиваются с углом дифракции [9], можно сделать вывод, что дифрагированное излучение, отклонившееся на углы выше 60° и рассеянное на поверхности экрана, будет обладать настолько слабой интенсивностью, что видеокамера не сможет его зафиксировать. Таким образом, использование известных технических решений для регистрации ДП в диапазоне углов дифракции $\alpha \leq \pm 80^\circ$ не представляется возможным из-за физических ограничений регистрирующих элементов.

В связи с этим для того, чтобы расширить диапазон телесных углов дифракции, регистрируемый видеокамерой, было предложено использовать объёмный рассеивающий экран (рис. 3).

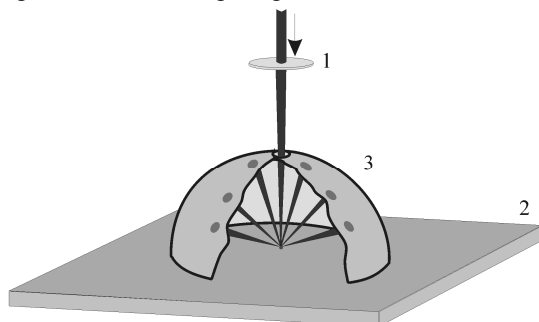


Рис. 3. Использование объёмного рассеивающего экрана для увеличения телесного угла регистрируемых видеокамерой ДП. 1 – фокусирующий объектив, 2 – исследуемый образец, 3 – объёмный рассеивающий экран

В данной работе было проведено исследование по определению оптимальной формы рассеивающего экрана, которая бы позволила производить регистрацию ДП на углах дифракции $\alpha \leq \pm 80^\circ$.

1.1. Полусферический рассеивающий экран

Рассмотрим использование рассеивающего экрана в форме полусферы:

$$\begin{cases} z^2 = r^2 - x^2 - y^2 \\ z \in [0; r] \end{cases}, \tag{3}$$

где r – радиус полусферы. Падающее излучение фокусируется в центр радиуса кривизны полусферического экрана, где и располагается исследуемый ДОО. Для простоты представления дальнейших рассуждений воспользуемся тем, что полусфера – это осесимметричная фигура. Это допущение позволяет рассматривать разложение ДП только в одной плоскости. Таким образом, будем считать, что центры ДП лежат в плоскости XZ, в которой полусфера представляет собой половину окружности с радиусом r (рис. 4). Также в силу осесимметричной формы рассеивающего экрана очевидно утверждение, что оптический путь от исследуемого элемента до поверхности экрана, пройденный дифрагированным излучением, отклонившимся на углы $+\alpha$ и $-\alpha$, абсолютно идентичен.

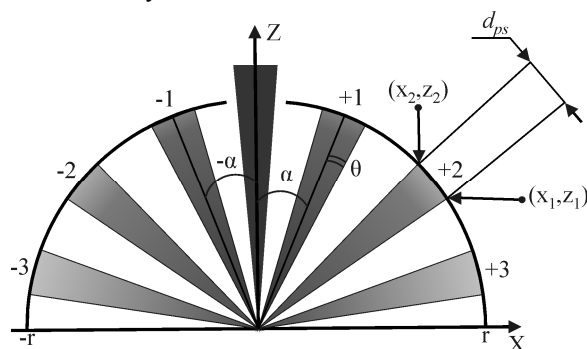


Рис. 4. Проецирование ДП на полусферический рассеивающий экран в плоскости XZ

Размер области дифрагированного излучения на поверхности полусферы зависит от угла расходимости пучка и оптического пути, пройденного до экрана. Координаты ДП на рассеивающем экране в зависимости от угла дифракции можно найти из уравнения:

$$\begin{cases} z_{1,2} = \sqrt{r^2 - x_{1,2}^2} \\ x_1 = z_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \theta), \\ x_2 = z_2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \theta) \end{cases}, \tag{4}$$

где 2θ – угол расходимости пучка. Так как падающее излучение фокусируется на исследуемом элементе в центре радиуса кривизны сферы, то оптический путь, пройденный дифрагированным излучением до рассеивающего экрана, не зависит от угла дифракции α и равен радиусу полусферы r .

Считая, что пучок света имеет равномерное распределение, размер пятен на поверхности полусферического экрана равен:

$$d_{ps} = r(\alpha + \theta - \alpha + \theta) = 2 \cdot r \cdot \theta, \tag{5}$$

откуда следует, что при использовании экрана в форме полусферы размер ДП на его поверхности не зависит от угла дифракции α , а зависит только от угла расходимости излучения θ .

ДП, попавшие на рассеивающий экран, проецируются объективом на плоскость светочувствительной матрицы видеокамеры X'Y', которая параллельна плоскости XY (рис. 5) и размер которой для простоты примем равным $2r$.

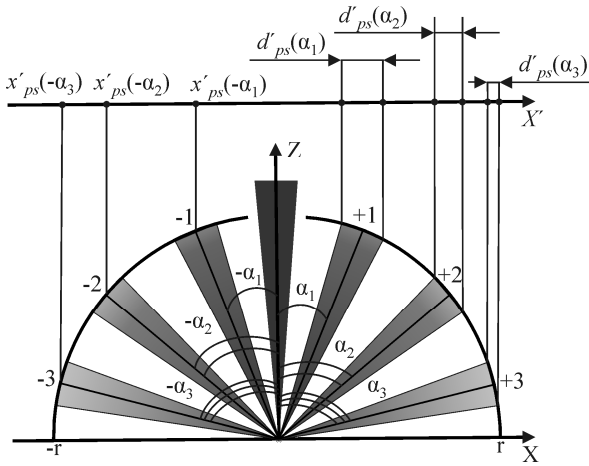


Рис. 5. Проецирование ДП на плоскость светочувствительной матрицы видеокамеры X' с поверхности полусферического рассеивающего экрана

Размер ДП в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры d'_{ps} зависит от угла дифракции и определяется из выражения:

$$d'_{ps} = |x_1 - x_2|. \tag{6}$$

График зависимости размера ДП в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры в зависимости от угла дифракции α представлен на рис. 6.

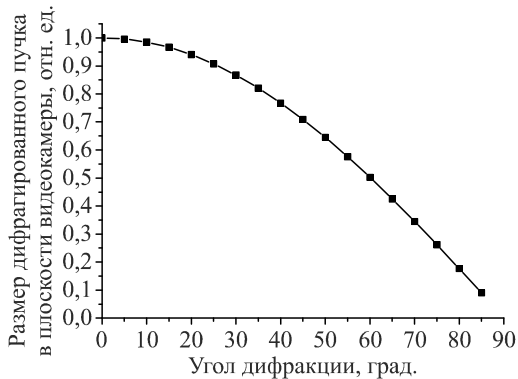


Рис. 6. Размер ДП в плоскости видеокамеры в зависимости от угла дифракции при использовании полусферического рассеивающего экрана

Как следует из уравнений (6), размер ДП в плоскости видеокамеры зависит от угла дифракции, в то время как размер ДП на поверхности рассеивающего экрана зависит только от угла расходимости излучения. Таким образом, при проецировании объективом реальной дифракционной картины с поверхности рассеивающего экрана на светочувствительную матрицу возникают искажения, которые влияют на точность измерения ПР ДП. Величину этих искажений можно выразить как:

$$f_{ps} = 1 - \frac{d'_{ps}}{d_{ps}} = 1 - \frac{90 \cdot |x_1 - x_2|}{r \cdot \pi \cdot \theta}. \tag{7}$$

На рис. 7 представлена зависимость искажения размеров ДП, регистрируемых видеокамерой, в зависимости от угла дифракции.

Определим координаты центров ДП в плоскости светочувствительной матрицы видеокамеры:

$$\begin{cases} z = \sqrt{r^2 - x_{ps}^2} \\ x'_{ps} = z \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \end{cases} \tag{8}$$

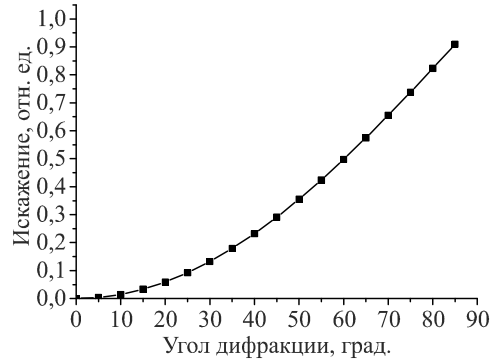


Рис. 7. Искажение размеров ДП, регистрируемых видеокамерой, при использовании полусферического рассеивающего экрана

Решение системы уравнений (8) показывает, что разрешение полусферического экрана резко ухудшается на углах дифракции выше 60° (рис. 8).

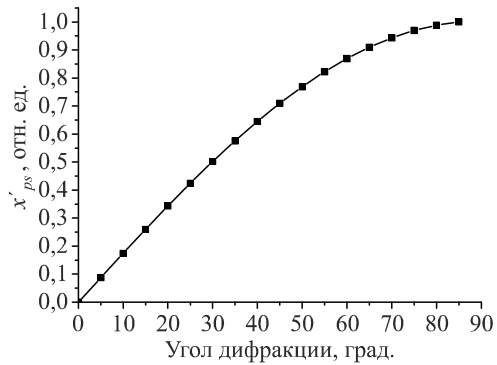


Рис. 8. Координаты центров ДП на светочувствительной матрице видеокамеры при проецировании дифракционной картины с поверхности полусферического рассеивающего экрана

При углах дифракции выше 60° расстояние между центрами ДП настолько мало, что не позволяет судить об угловом распределении с точностью, необходимой для определения периода исследуемого элемента. Таким образом, использование полусферического рассеивающего экрана также не позволяет производить контроль ПР ДП в телесном угле дифракции $\alpha \leq \pm 80^\circ$.

1.2. Выбор формы рассеивающего экрана

На основе анализа недостатков рассеивающего экрана, выполненного в форме полусферы (см. пункт 1.1), для дальнейшего исследования было предложено два варианта формы объёмного рассеивающего экрана. Первый исследуемый рассеивающий экран представляет собой область полусферического экрана с радиусом $2r$, в которой функция проецирования центров ДП на плоскость светочувствительной матрицы видеокамеры $X'_{ps}(\alpha)$ является близкой к линейной:

$$\begin{cases} z_{rps}^2 = (2 \cdot r)^2 - x_{rps}^2 - y_{rps}^2 \\ z_{rps} \in [r; 2r] \end{cases} \tag{9}$$

В качестве второго исследуемого рассеивающего экрана было предложено использовать асферическую поверхность (эллиптический параболоид), форма которой максимально приближена к полусферическому экрану с радиусом r , в области, где $X'_{ps}(\alpha)$ также представляет собой близкую к линейной функцию:

$$\begin{cases} z_{par} = r - \frac{x_{par}^2 + y_{par}^2}{1,69 \cdot r} \\ z_{par} \in [0; r] \end{cases} \quad (10)$$

В дальнейшем будем обозначать эти рассеивающие экраны как №1 и №2 соответственно. Обе формы исследуемых рассеивающих экранов являются осесимметричными, в связи с этим все допущения, которые мы использовали для исследования рассеивающего экрана в форме полусферы, справедливы и для дальнейших рассуждений.

Рассмотрим, как будут проецироваться координаты центров ДП на светочувствительную матрицу видеокамеры при использовании рассеивающих экранов №1 и №2. Для рассеивающего экрана №1 систему уравнений можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} z_{rps} = \sqrt{(2 \cdot r)^2 - x_{rps}^2} - r \\ x_{rps} = z_{rps} \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \\ z_{rps} \in [0; r] \end{cases} \quad (11)$$

а для рассеивающего экрана №2:

$$\begin{cases} z_{par} = r - \frac{x_{par}^2}{1,69 \cdot r} \\ x_{par} = z_{par} \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \\ z_{par} \in [0; r] \end{cases} \quad (12)$$

На рис. 9 представлены результаты моделирования определения центров ДП видеокамерой при использовании экранов №1 и №2, из которого следует, что оба экрана осуществляют преобразование углового распределения в плоскость фоточувствительной матрицы, достаточно близкое к линейному, в широком диапазоне углов дифракции.

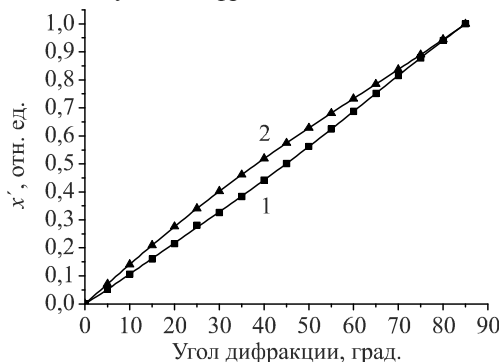


Рис. 9. Координаты центров ДП при проецировании с поверхности рассеивающего экрана №1 (кривая 1) и экрана №2 (кривая 2) на светочувствительную матрицу видеокамеры в зависимости от угла дифракции

Однако при использовании рассеивающих экранов №1 и №2, в отличие от рассеивающего экрана в форме полусферы, оптический путь дифрагированного излучения от исследуемого элемента до поверхности экранов зависит от угла дифракции α , а размер пятна на поверхности рассеивающего экрана, в свою очередь, зависит от длины оптического пути, пройденного дифрагированным пучком. В связи с этим при использовании исследуемых рассеивающих экранов №1 и №2 размер пятна на экране зависит от угла дифракции α .

Систему уравнений для экрана №1 можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} (z_{rps})_{1,2} = \sqrt{(2 \cdot r)^2 - (x_{rps})_{1,2}^2} - r \\ (x_{rps})_1 = (z_{rps})_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \theta) \\ (x_{rps})_2 = (z_{rps})_2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \theta) \\ (z_{rps})_{1,2} \in [0; r] \end{cases} \quad (13)$$

Для параболического экрана №2 система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} (z_{par})_{1,2} = r - \frac{(x_{par})_{1,2}^2}{1,69 \cdot r} \\ (x_{par})_1 = (z_{par})_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \theta) \\ (x_{par})_2 = (z_{par})_2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \theta) \\ (z_{par})_{1,2} \in [0; r] \end{cases} \quad (14)$$

Из (13) и (14) можно определить размеры ДП на поверхности рассеивающих экранов №1 и №2:

$$d_{rps} = \sqrt{((x_{rps})_2 - (x_{rps})_1)^2 + ((z_{rps})_1 - (z_{rps})_2)^2} \quad (15)$$

$$d_{par} = \sqrt{((x_{par})_2 - (x_{par})_1)^2 + ((z_{par})_1 - (z_{par})_2)^2} \quad (16)$$

Размер ДП на поверхности рассеивающих экранов в зависимости от угла дифракции представлен на рис. 10.

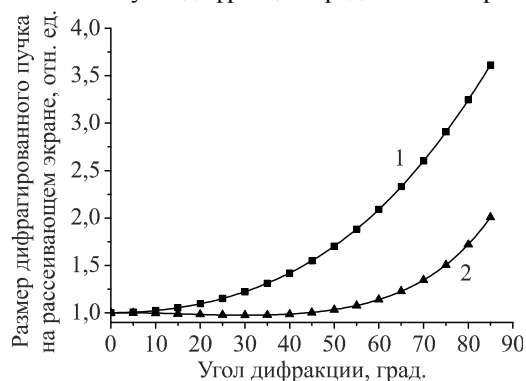


Рис. 10. Размеры ДП на поверхности рассеивающего экрана №1 (кривая 1) и экрана №2 (кривая 2) в зависимости от угла дифракции

Результаты моделирования показывают, что поперечные размеры пучка на рассеивающем экране №1 больше, чем на рассеивающем экране №2 при углах дифракции выше 10° . Это связано с тем, что экран №2 имеет меньшие габаритные размеры по сравнению с экраном №1.

Аналогично, как и для экрана в форме полусферы, запишем размер ДП на плоскости фоточувствительной матрицы видеокамеры в зависимости от угла дифракции при использовании экрана №1 и №2:

$$d'_{rps} = \left| (x_{rps})_1 - (x_{rps})_2 \right|, \tag{17}$$

$$d'_{par} = \left| (x_{par})_1 - (x_{par})_2 \right|. \tag{18}$$

Результаты моделирования проецирования ДП с поверхности рассеивающих экранов №1 и №2 на светочувствительную матрицу представлены на рис. 11.

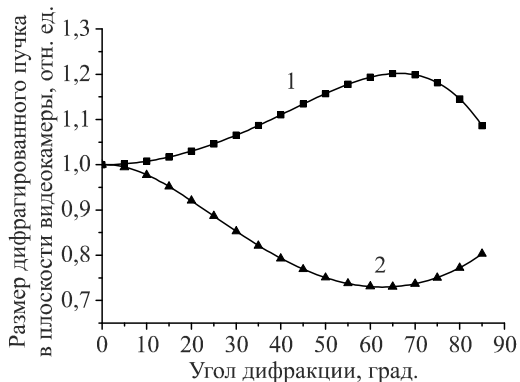


Рис. 11. Размеры ДП на светочувствительной матрице видеокамеры при использовании рассеивающего экрана №1 (кривая 1) и экрана №2 (кривая 2) в зависимости от угла дифракции

Как было сказано ранее, увеличение поперечного размера пятна на поверхности рассеивающего экрана может затруднить измерение пространственного распределения ДП, имеющих малую интенсивность, особенно при больших углах дифракции.

Аналогично, как и для полусферического экрана, рассчитаем величину искажений размеров пятна при проецировании изображения с экранов №1 и №2 на плоскость светочувствительной матрицы видеокамеры:

$$f_{rps} = 1 - \frac{d'_{rps}}{d_{rps}}, \tag{19}$$

$$f_{par} = 1 - \frac{d'_{par}}{d_{par}}.$$

Результаты моделирования, представленные на рис. 12, показывают, что при углах дифракции выше 35° дифрагированный пучок при проецировании с рассеивающего экрана №1 на светочувствительную матрицу видеокамеры испытывает большие искажения, чем при использовании экрана №2.

На основе проведенного исследования можно сделать вывод, что рассеивающие экраны №1 и №2 позволяют регистрировать ПР ДП в широком диапазоне углов дифракции. Однако рассеивающий экран в форме эллиптического параболоида №2 обладает лучшими характеристиками по сравнению с рассеивающим экраном №1. В связи с этим в дальнейшем предлагается использовать рассеивающий экран №2.

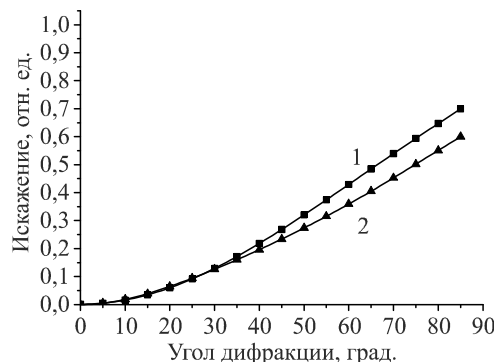


Рис. 12. Искажения размеров ДП при проецировании с поверхности рассеивающих экранов №1 (кривая 1) и №2 (кривая 2) на светочувствительную матрицу видеокамеры в зависимости от угла дифракции

2. Система измерения

В рамках данной работы было разработано устройство, которое позволяет производить контроль ПР ДП в широком телесном угле дифракции при исследовании ДОО, работающих как на пропускание, так и на отражение падающего излучения. Оптическая схема устройства представлена на рис. 13. В основе измерительной системы лежит метод последовательного сканирования исследуемого элемента лазерным пучком диаметром D. Рабочая область ДОО разбивается на N локальных участков, площадь которых определяется размером сканирующего светового пятна. Излучение сканирующего пятна, попадая на поверхность микрорельефа ДОО, дифрагирует на его структуре. Затем осуществляется регистрация углового положения ДП. Помимо этого, измеряется интенсивность в ДП I_m и нормируется на текущее значение интенсивности падающего на элемент излучения I_{in} . В результате нормировки получается значение дифракционной эффективности (ДЭ) в локальной области ДОО:

$$\eta(x, y) = I_m / I_{in}. \tag{20}$$

Сопоставив полученные значения углового распределения и ДЭ с координатами площадок N, можно получить ПР ДП по всей площади исследуемого элемента.

Устройство работает следующим образом: излучение, генерируемое лазерным модулем 1 (могут использоваться лазерные модули с длиной волны от 0,405 до 0,850 мкм), пройдя через фокусирующую линзу 4, попадает на прямоугольную призму 5 и через отверстие в рассеивающем экране 6 фокусируется на исследуемом ДОО 7. Перемещение исследуемого элемента относительно сканирующего пучка осуществляется XY координатной системой 9. Отражённое и прошедшее излучение раскладывается в угловой спектр и попадает на рассеивающие экраны 6 и 8, рассеянное излучение с которых с помощью объективов 10 и 12 проецируется на светочувствительные матрицы видеокамер 11 и 13. Управляющий компьютер 14 производит обработку изображений и определяет ПР ДП в каждой локальной области на поверхности ДОО.

Если динамического диапазона видеокамер недостаточно, то интенсивность падающего излучения уменьшается и снова осуществляется регистрация ПР ДП в данной локальной области поверхности исследуемого элемента [8]. Управление интенсивностью падающего излучения и всеми приводами установки также осуществляется управляющим компьютером.

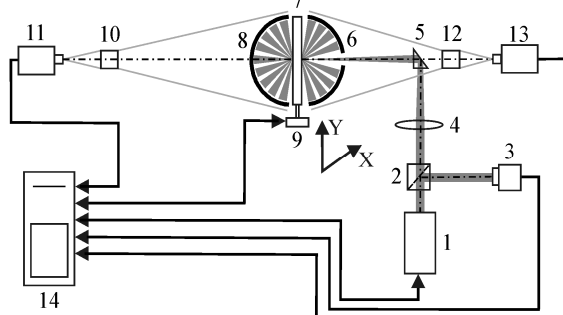


Рис. 13. Упрощённая оптическая схема устройства для контроля ПР ДП: 1 – лазерный модуль, 2 – светоделительная пластинка, 3 – фотоприёмник, 4 – фокусирующая линза, 5 – прямоугольная призма, 6 – рассеивающий экран с отверстием, 7 – ДОЭ, 8 – рассеивающий экран без отверстия, 9 – XY координатная система, 10 и 12 – объективы, 11 и 13 – видеокамера, 14 – управляющий компьютер

Если используемый лазерный модуль не позволяет передавать на управляющий компьютер данные об интенсивности падающего на элемент излучения I_{in} , то для измерения этого показателя в оптическую схему необходимо ввести светоделительную пластинку 2 и фотоприёмник 3.

3. Экспериментальные результаты

Для проведения экспериментального исследования по восстановлению периода ДОЭ по данным измерения углового распределения ДП, полученного на разработанном нами устройстве, был использован дифракционный элемент, работающий на отражение падающего излучения, с бинарной периодической структурой. Измерения проводились в трёх локальных областях исследуемого ДОЭ, период которых был предварительно измерен на WLI-интерферометре и составил 5,0 мкм, 2,5 мкм и 1,5 мкм (рис. 14).

Исследуемый ДОЭ устанавливался на XY координатном столике. В качестве источника излучения использовался одномодовый полупроводниковый лазер с длиной волны 0,635 мкм. Его излучение фокусировалось на поверхность исследуемого ДОЭ с помощью длиннофокусной линзы. Диаметр лазерного пятна на поверхности ДОЭ составлял около 50 мкм.

Для регистрации ДП использовался рассеивающий экран параболической формы, выполненный из стекла, с диаметром основания около 60 мм ($r=23$ мм) и с отверстием для ввода излучения.

Изображение набора ДП с внешней поверхности рассеивающего экрана регистрировалось цифровой GigE Vision (Ethernet) видеокамерой CV-M9GE, имеющей три CCD-призмы и три CCD-матрицы, размер которых составляет 1/3" дюйма с разрешением

1024×768, снабжённой проекционным объективом ($f=35$ мм). Полученные изображения передавались на управляющий компьютер, где и проводился анализ углов отклонения каждого ДП.

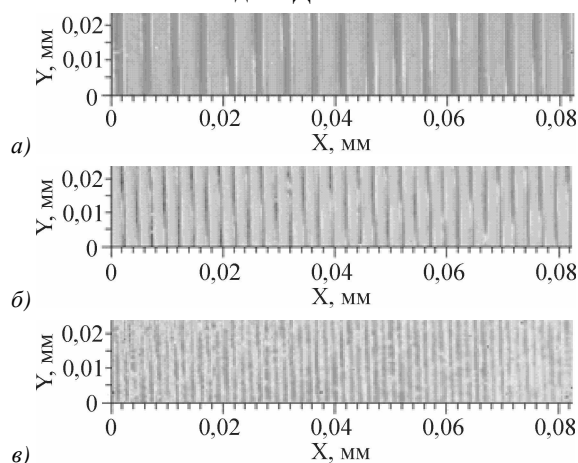


Рис. 14. Измерение периода микрорельефа на WLI-интерферометре в исследуемых локальных областях ДОЭ: а) 5,0 мкм, б) 2,5 мкм и в) 1,5 мкм

На рис. 15 показан пример регистрации видеокамерой углового распределения ДП в исследуемых локальных областях поверхности ДОЭ, имеющих различный период. Штриховой линией отмечена область регистрации (захвата) ДП. По полученным данным углового распределения ДП согласно формуле (1) определялся период в каждой локальной области, который составил 5,0, 2,5 и 1,5 мкм соответственно (погрешность не более 0,05 мкм (СКО)). Т.е. результаты измерения периода ДОЭ разработанным устройством и микроинтерферометром (рис. 14) полностью совпали.

4. Обсуждение результатов

В технологическом процессе изготовления ДОЭ крайне важно оперативно проводить контроль параметров микрорельефа (глубины, скважности и т.д.). Особенно это актуально при создании новых типов прецизионных комбинированных ДОЭ [10] для формирования асферических волновых фронтов. Для обеспечения формирования измерительного и опорного волновых фронтов с погрешностью менее 1/100 длины волны глубина рельефа ДОЭ должна выдерживаться с погрешностью единицы нанометров.

Так как размеры ДОЭ для контроля асферики обычно составляют 100–230 мм при толщине подложки до 25 мм, то применение известных методов (микроинтерферометры, атомные микроскопы, профилометры) практически невозможно. Кроме всего, для контроля комбинированных ДОЭ необходимо одновременно проводить измерение параметров микрорельефа как на проход, так и на отражение. Это связано с тем, что комбинированные ДОЭ изготавливаются в виде многослойной структуры, параметры которой на проход и на отражение различны.

В частности, для контроля именно этого класса ДОЭ и было разработано устройство, описанное в настоящей работе.

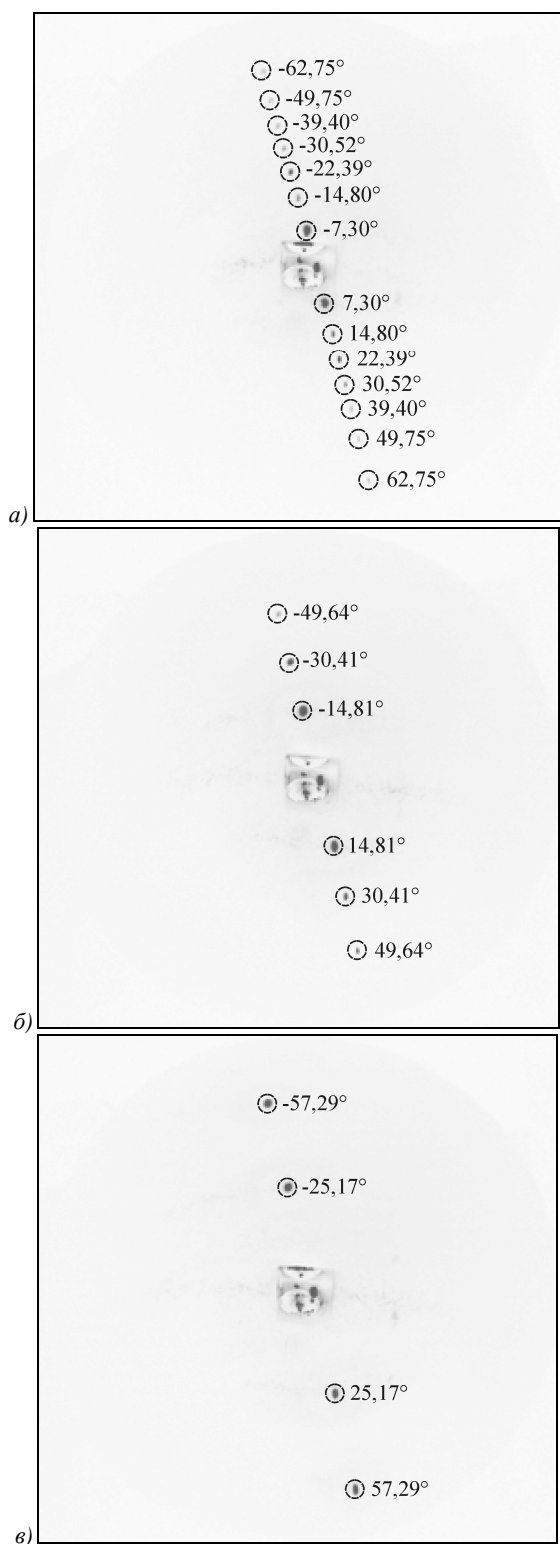


Рис. 15. Полученные карты углового распределения (негативное представление) в локальных областях исследуемого ДОЭ с периодом (а) 5 мкм, (б) 2,5 мкм и (в) 1,5 мкм

Предложенный в работе метод одновременной регистрации видеокамерой (время экспозиции < 1 мс) множества ДП в телесном угле $\alpha \leq \pm 80^\circ$ и по азимуту 360° позволяет проводить измерение, непрерывно сканируя поверхность ДОЭ координатным столом 9 (рис. 13). Это позволяет провести контроль всей поверхности ДОЭ за

приемлемое время. В работе была впервые предложена, промоделирована и экспериментально проверена идея использования экрана асферической формы (№2) в виде эллиптического параболоида. Экспериментально продемонстрирована возможность измерения периодов (от 1,5 мкм до 5 мкм) и ориентации дифракционных структур ДОЭ. На практике этот диапазон более широкий (0,6 – 50 мкм), так как имеется возможность использовать лазерные модули с различной длиной волны. Однако величина этого диапазона принципиально ограничена технически минимальным регистрируемым углом дифракции в отражённом свете (сейчас это 1–2 град.). Важной особенностью данного устройства является возможность измерения индикатрис рассеяния отражающих и/или пропускающих оптических материалов. Это потенциально позволяет применить данное устройство для контроля поверхности ДОЭ, изготавливаемых методом алмазного точения.

Помимо этого, разработанная в рамках данной работы концепция прибора не ограничена в применении лишь для определения параметров микрорельефа ДОЭ. Измерение и анализ непрерывной индикатрисы рассеяния применяется для определения шероховатости поверхности изделий из различных материалов [11, 12], что, в свою очередь, может быть использовано как в научных, так и в промышленных целях.

Таким образом, предложенное устройство имеет как явные достоинства, так и некоторые недостатки (табл. 1). По мнению авторов, устройство имеет явные достоинства и может быть применено в технологической цепочке изготовления высококачественных ДОЭ.

Табл. 1. Достоинства и недостатки разработанного устройства

Достоинства	Недостатки
Проведение измерений одновременно на проход и отражение	В связи с наличием в одном из рассеивающих экранов отверстия для ввода излучения минимальный регистрируемый угол дифракции в отражённом свете ограничен величиной порядка 1 – 2 град.
Диапазон углов: телесный угол $\alpha \leq \pm 80^\circ$, по азимуту 360°	
Диапазон периодов: 0,6 – 50 мкм	Отсутствует возможность контроля ДОЭ с периодом > 50 мкм в отражённом свете
Высокая скорость измерения: менее 1 мс на точку	Скорость на практике ограничена скоростью сканирования столом
Возможность регистрации как дискретных, так и непрерывных индикатрис рассеяния	

Заключение

Предложено, промоделировано и экспериментально апробировано оптико-электронное устройство для измерения ПР ДП в телесном угле $\alpha \leq \pm 80^\circ$ и по азимуту 360° для ДОЭ, работающих как на про-

пускание, так и на отражение падающего излучения. Устройство предназначено для контроля формы рельефа поверхности ДОО в процессе производства. Отличительной чертой устройства является высокая скорость измерений, простота конструкции и достаточно большой диапазон одновременно контролируемых углов ДП.

Проведённый анализ и моделирование показали, что ключевой элемент предложенного устройства – рассеивающий объёмный экран должен иметь форму эллиптического параболоида.

Благодарности

Данная работа поддержана частично грантом РФФИ ОФИ-М № 4-29-07227, междисциплинарным интеграционным проектом № 112 Сибирского отделения РАН и проектом № 2012-218-03-004 Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. Методы компьютерной оптики / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, Л.Д. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, В.С. Соловьев, Г.В. Успенев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Сойфера. – изд. 2-е, испр. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с.
2. Волков, А.В. Контроль параметров микрорельефа ДОО с использованием тестовых дифракционных структур / А.В. Волков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2001. – № 12. – С. 179-185. – ISSN 1991-8615.
3. Golub, M.A. Optical performance evaluation from micro-relief profile scans of diffractive optical elements / M.A. Golub // International meeting: Diffractive Optics and Micro-Optics, DOMO 2000. – 2000. – Vol. 1. – P. 110-112.
4. Кирьянов, В.П. Измерение эффективности дифракционных оптических элементов методом сканирования / В.П. Кирьянов, В.Г. Никитин // Автометрия. – 2004. – Т. 40, № 5. – С. 82-93. – ISSN 0320-7102.
5. Белоусов, Д.А. Прибор для измерения дифракционной эффективности в широком динамическом диапазоне / Д.А. Белоусов в сб.: Материалы всероссийской научной конференции молодых учёных "Наука. Технологии. Инновации" – Ч.1. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2014. – С. 15-19.
6. Котляр, В.В. Измерение орбитального углового момента светового поля с помощью дифракционного оптического элемента / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, В.А. Сойфер, Я. Янг // Автометрия. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 33-44. – ISSN 0320-7102.
7. Cai, W. Diffractive optics calibrator measurement of etching variations for binary computer-generated-holograms / W. Cai, P. Zhou, C. Zhao, J. H. Burge // Applied Optics. – 2014. – № 53. – P. 2477-2486. – ISSN 1539-4522.
8. Хомутов, В.Н. Измерение дифракционной эффективности ДОО по многим порядкам дифракции / В.Н. Хомутов, А.Г. Полещук, В.В. Черкашин // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 196-202. – ISSN 0134-2452.
9. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. – М.: Наука, 1973. – 720 с. (M. Born, E. Volf. Principles of optics. – N.Y.: Pergamon press. Publishers, 1968.)
10. Полещук, А.Г. Дифракционные оптические элементы для управления параметрами лазерного излучения и прецизионного контроля формы асферических поверхностей / А.Г. Полещук, В.П. Корольков, Р.К. Насыров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI международный научный конгресс и выставка (Новосибирск, 20-22 апр. 2014 г.): Международная научная конференция «СибОптика-2015»: сб. матер. в 5 т. – 2015. – Вып. 2, Т. 2. – С. 232-238.
11. Абросимов, С.А. Измеритель шероховатости поверхности в диапазоне 1-25 нм по индикатрисе рассеянного света / С.А. Абросимов, М.В. Высокорец, А.А. Малютин, А.В. Ненашев, Р.В. Серов // Квантовая электроника. – 1994. – Т. 21, №1 – С. 78-80.
12. Барышников, Н.В. Анализ методов измерения шероховатости поверхности и экспериментальное исследование диффузного рассеяния на базе рефлектометрического метода / Н.В. Барышников, Д.Г. Денисов, И.В. Животовский, А.Ю. Каплин // Молодёжный научно-технический вестник – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – №1. – С. 30-41.

References

- [1] Soifer VA, Kotlyar VV, Kazanskiy NL, Doskolovich LL, Kharitonov SI, Khonina SN, Pavelyev VS, Skidanov RV, Volkov AV, Golovashkin DL, Solovyev VS, Uspleneyev GV. Methods for computer design of diffractive optical elements. Ed by Soifer VA. New York: John Wiley & Sons, Inc; 2002.
- [2] Volkov AV. Control of parameters of a micro relief of DOE with use of test diffraction structures [in Russian]. Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki 2001; 12: 179-84.
- [3] Golub MA. Optical performance evaluation from micro relief profile scans of diffractive optical elements. International meeting: Diffractive Optics and Micro-Optics, DOMO 2000; 1: 110-2.
- [4] Kirjanov VP, Nikitin VG. Measurement of efficiency of diffraction optical elements by a scanning method [in Russian]. Autometry 2004; 40(5): 82-93.
- [5] Belousov DA, Poleschchuk AG. The device for diffraction efficiency measurement in the high dynamic range [in Russian]. Proceedings of the Scientific Conference of Young Scientists: Science. Technology. Innovation. Novosibirsk: "NSTU" Publisher 2014; 1: 15-9
- [6] Kotlyar VV, Khonina SN, Soyfer VA, Jang J. Measurement of the orbital angular moment of a light field by means of a diffraction optical element [in Russian]. Autometry 2002; 38(3): 33-44.
- [7] Cai W, Zhou P, Zhao C, Burge JH. Diffractive optics calibrator measurement of etching variations for binary computer-generated holograms. Applied Optics 2014; 53: 2477-86.
- [8] Khomutov VN, Poleschchuk AG, Cherkashin VV. Measurement of diffraction efficiency of DOE in many diffractive orders [in Russian]. Computer Optics 2011; 35: 196-201.
- [9] Born M, Volf E. Principles of optics. New York: Pergamon press. Publishers; 1968.
- [10] Poleschchuk AG, Korolkov VP, Nasyrov R.K. Diffractive optical elements for controlling the parameters of the laser and precision control the shape of aspheric surfaces. Interexpo GEO-Siberia-2015. XI International Scientific Congress and Exhibition (Novosibirsk, April 20-22, 2014): International scientific conference "SibOptika-2015": material collection in 5 volumes. Novosibirsk 2015; 2(2): 232-8.
- [11] Abrosimov SA, Vysogorets MV, Malutin AA, Nenashev AV, Serov RV. Surface roughness meter for the range 1-25 nm based on the scattered-light indicatrix. Quantum electron 1994; 24(1): 75-7. DOI: 10.1070/QE1994v024n01ABEH000006.
- [12] Baryshnikov NV, Denisov DG, Zhivotovsky IV, Caplin AYU. Analysis of methods for measuring surface roughness and experimental study of the diffuse scattering based on the reflectometry method. Youth Science and Technology Gazette. Moscow: Bauman MSTU Press; 2012; 1: 30-41.

MONITORING A SPATIAL INTENSITY DISTRIBUTION OF TRANSMITTED AND REFLECTED LIGHT IN A DIFFRACTIVE STRUCTURE

D.A. Belousov, A.G. Poleshchuk, V.N. Khomutov

Institute of Automation & Electrometry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Abstract

We propose a method and a design of a device for an on-line monitoring of a spatial intensity distribution of transmitted and reflected diffraction orders found within a $\pm 80^\circ$ solid angle and a 360° azimuthal angle. The proposed device is intended to serve as a shape and depth profiler of the diffractive element microrelief in the course of manufacturing.

Keywords: diffractive optics, computer optics, diffractive optical elements (DOEs), synthesized holograms, measuring system.

Citation: Belousov DA, Poleshchuk AG, Khomutov VN. Monitoring a spatial distribution of transmitted and reflected light in a diffractive structure. *Computer Optics* 2015; 39(5): 678-86. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-678-686.

Acknowledgements: This work was partially supported by the Russian Foundation of Basic Research Grant OFI-M No. 4-29-07227, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences interdisciplinary integration project No. 112, and the RF Ministry of Education and Science, project No. 2012-218-03-004.

Сведения об авторах

Белоусов Дмитрий Александрович, 1991 года рождения. В 2015 году окончил Новосибирский государственный технический университет по специальности «Лазерные системы в науке и технике». Работает инженером-программистом в лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН. Область научных интересов: компьютерная оптика, лазерные технологии, цифровая измерительная техника.

E-mail: d.a.belousov91@gmail.com.

Dmitrij Aleksandrovich Belousov, (b. 1991) graduated from Novosibirsk State Technical University in 2015, majoring in Laser Systems in Science and Technology. Currently he works as the software engineer in Diffractive Optics laboratory of the Institute of Automation & Electrometry Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IAE SB RAS). His research interests are computer optics, laser technology and digital measurement technics.

Полещук Александр Григорьевич, доктор технических наук, работает в ИАиЭ СО РАН с 1973 года, кандидат наук с 1980 года, доктор технических наук с 2003 года. В 1997 был избран на должность заведующего лабораторией лазерных технологий, затем лабораторией дифракционной оптики. А.Г. Полещук является автором более 300 научных работ, опубликованных в отечественных и зарубежных журналах и сборниках, в том числе 2 монографий и более 35 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Область научных интересов: компьютерная оптика, лазерная интерферометрия, лазерные технологии.

E-mail: poleshchuk@iae.nsk.su.

Alexander Grigorievich Poleshchuk, Dr.Sci.Tech., since 1973 he currently works in the Institute of Automation & Electrometry Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IAE SB RAS). He received Candidate degree in 1980 and Doctor of Technical Science in 2003. In 1997 he was selected as a head of Diffractive Optics laboratory at IAE SB RAS. He is co-author of more than 300 scientific papers, one monograph and more than 35 inventions and patents. His research interests are computer optics, laser interferometry and laser technology.

Хомутов Владимир Николаевич, 1987 года рождения. В 2010 году окончил Новосибирский государственный технический университет по специальности «Физика оптических явлений». Работает младшим научным сотрудником в лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН. Область научных интересов: компьютерная оптика, электроника, лазерная интерферометрия, цифровая измерительная техника.

E-mail: v.n.homutov@gmail.com.

Vladimir Nikolayevich Khomutov, (b. 1987) graduated from Novosibirsk State Technical University in 2010, majoring in Physics of Optical Phenomena. Currently he works as the junior research assistant at the Diffractive Optics laboratory of the Institute of Automation & Electrometry Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IAE SB RAS). His research interests are computer optics, electronics, laser interferometry and digital measurement technics.

*Поступила в редакцию 11 августа 2015 г.
Окончательный вариант – 6 ноября 2015 г.*