

Калибровка цифровых видеокамер для прецизионной дифрактометрии

Д.А. Белоусов
Институт автоматики и
электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия
belousovda@iae.nsk.su

В.П. Корольков
Институт автоматики и
электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия
victork@iae.nsk.su

Р.И. Куц
Институт автоматики и
электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия
r.i.kuts@mail.ru

В.В. Черкашин
Институт автоматики и
электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия
cherkaschin@iae.nsk.su

А.Е. Качкин
Институт автоматики и
электрометрии СО РАН
Новосибирск, Россия
kachkin@iae.nsk.su

Аннотация — В работе рассмотрены особенности использования цифровых видеокамер для регистрации дифракционной картины с целью автоматизации метода оптической дифрактометрии. Описаны алгоритмы калибровки матрицы видеокамеры и анализа дифракционных картин для контроля периодов, угловой ориентации структур и дифракционной эффективности ДОЭ.

Ключевые слова — дифракционная оптика, дифракционные оптические элементы, обработка изображений, измерительные системы

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к оптическим системам и устройствам, в которых используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ), задают высокие стандарты качества при изготовлении данных элементов. Это обусловлено тем, что отклонения сформированной рабочей дифракционной структуры от расчётных значений приводят к ошибкам формируемого ДОЭ волнового фронта и/или к снижению энергетической эффективности осуществляемого элементом преобразования падающего излучения. При контроле качества изготавливаемых ДОЭ наряду с классическими методами измерения глубины и формы поверхности, используется метод оптической дифрактометрии [1,2], который позволяет помимо геометрических характеристик исследуемой дифракционной структуры оценить также энергетическую эффективность осуществляемого элементом преобразования падающего излучения. В данной работе рассмотрены особенности использования цифровых видеокамер для регистрации дифракционной картины (ДК), с целью создания автоматических систем, реализующих метод оптической дифрактометрии для контроля параметров ДОЭ.

2. АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ВИДЕОКАМЕР

В ИАиЭ СО РАН были реализованы различные схемы дифрактометрических устройств, в которых регистрация ДК осуществляется с использованием одной или нескольких статично установленной цифровых видеокамер. Для регистрации ДК в широком телесном угле дифракции были предложены и реализованы схемы устройств, в которых регистрация дифрагированного излучения осуществляется с поверхности плоского [2], полусферического [3] или асферического [4] рассеивающего экрана, а также с поверхности

оптоволоконного фокона [3,5]. Также, для контроля ДОЭ, предназначенных для мультипликации световых пучков, было создано устройство, в котором матрица полезных дифракционных порядков (ДП) исследуемого элемента проецируется непосредственно на светочувствительную матрицу видеокамеры [6].

Для контроля периода и угловой ориентации квазипериодической структуры ДОЭ по анализу зарегистрированных ДК необходимо установить соответствие между XY координатами пикселей на матрице видеокамеры с угловыми координатами дифрагированного излучения (углом дифракции α и углом ориентации φ). Калибровка координат пикселей видеокамеры может быть выполнена путём регистрации ДК ряда дифракционных решёток с известными периодами и угловой ориентацией, формирующих ДП в заданном угловом диапазоне с достаточным шагом дискретизации по углу дифракции. После выполнения калибровки при нормальном падении пробного лазерного пучка с длиной волны λ на исследуемую структуру ДОЭ, по анализу зарегистрированной ДК период d в локально контролируемой области элемента, которая определяется размером пробного лазерного пучка, можно определить по формуле:

$$d = m * \lambda / \sin(\alpha_m). \quad (1)$$

Функция синуса не линейна и с увеличением угла дифракции величина $\sin(\alpha_m)$ менее чувствительна к ошибкам его определения. В связи с этим, для более точного определения периода по анализу зарегистрированных ДК нужно использовать данные, полученные для ДП с максимальным углом дифракции $|\alpha_m|$. При регистрации ДК видеокамерой в широком телесном угле дифракции вышеуказанное утверждение справедливо и для более точного определения угла ориентации φ_m исследуемой структуры, так как ДП с большим углом дифракции на полученном изображении лежат на большем радиусе, и как следствие, имеют большую дискретизацию по углу ориентации.

При измерении дифракционной эффективности (ДЭ) ДП также необходимо осуществлять калибровку эффективности преобразования света, регистрируемого видеокамерой в различных участках светочувствительной матрицы. При этом данный параметр по всей площади матрицы не однороден и, как следствие, при осуществлении калибровки нельзя интерполировать данные полученные на отдельных

участках на всю площадь матрицы видеокамеры. В связи с этим, с использованием видеокамеры измерение ДЭ можно осуществлять только для тех углов дифракции, которые непосредственно были откалиброваны. Кроме того, калибровку локального участка матрицы нужно производить при тех же настройках камеры, которые будут использованы при измерении исследуемого элемента. Всё это приводит к тому, что нужно иметь либо большой набор калибровочных структур, либо иметь калибр, являющийся своеобразным эталоном для контролируемого ДОЭ. ДЭ всех порядков дифракции такого эталона предварительно должна быть измерена.

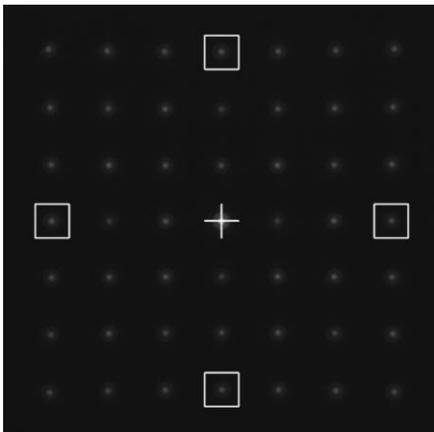


Рис. 1. Совмещение дифракционной картины исследуемого дифракционного мультипликатора по эталонным меткам

Предварительное измерение ДЭ калибровочных элементов с помощью сканирования светочувствительным датчиком было реализовано на автоматической установке контроля ДОЭ, предназначенных для мультипликации световых пучков [6]. Для этого калибровочный элемент (эталон) устанавливается в держатель, размер пропускающего окна которого соответствует размеру пробного лазерного пучка. Эталон помещается в оптический канал дифрактометра и датчиком измерителя мощности оптического излучения осуществляется сканирование в пространстве дифракционных максимумов (при одновременной регистрации флуктуаций мощности входного пучка). Полученные данные сохраняются в программе. При осуществлении контроля исследуемого ДОЭ данный эталон устанавливается на ХУ-стол вместе с элементом. Исследуемый элемент и эталон должны располагаться в одной плоскости. Поэтому центральный и крайние накрест лежащие ДП исследуемого элемента при его установке на дифрактометр совмещаются на матрице видеокамеры с метками, которые определяются по соответствующим ДП эталонного элемента (Рис. 1). При осуществлении измерений сначала регистрируется ДК эталонного элемента и для каждого ДП вносится соответствующий коэффициент коррекции, согласно массиву измеренных ранее данных, для корректного определения ДЭ всех ДП. Затем, с учётом полученных коэффициентов коррекции осуществляется сканирование и анализ ДК в области исследуемого ДОЭ. При использовании видеокамеры, для которой наблюдается тепловой дрейф чувствительности различных участков регистрирующей матрицы, необходимо периодически повторять калибровку в процессе выполнения измерений.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате разработки и исследования различных автоматических дифрактометрических систем контроля параметров ДОЭ можно отметить, что для

прецизионного контроля периода исследуемых элементов (в широком диапазоне изменения периодов дифракционных структур) необходимо обеспечить регистрацию дифракционной картины цифровой видеокамерой в широком телесном угле дифракции. Для этого могут быть использованы рассеивающие экраны различной конфигурации. При этом повышении точности контроля периода и угловой ориентации дифракционных структур можно добиться, регистрируя все видимые дифракционные максимумы и осуществляя определение вышеописанных параметров по ДП имеющим максимальный угол дифракции. Для контроля дифракционной эффективности ДОЭ, необходимо осуществлять калибровку регистрируемой видеокамерой мощности излучения для всех углов дифракции, формируемых исследуемым элементом. Для этого можно использовать либо набор калибровочных дифракционных решёток, либо эталонный элемент, пространственное распределение ДП, которого совпадает с пространственным распределением ДП исследуемого элемента.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (№ гос.регистрации 121041500060-2).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kiryanov, V.P. Development and research of the scanning method for testing of diffraction optical / V.P. Kiryanov, V.G. Nikitin, A.G. Verkhogliad // Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. – International Society for Optics and Photonics. – 2002. – Vol. 4900. – P. 977–982. DOI: 10.1117/12.484490.
- [2] Полешук, А.Г. Измерение дифракционной эффективности ДОЭ по многим порядкам дифракции/ А.Г. Полешук, В.Н. Хомутов, В.В. Черкашин // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, №. 2. – С. 196-202.
- [3] Belousov, D.A. Laser beam diffraction inspection of periodic metal/oxide structures with submicron period / D.A. Belousov, V.P. Korolkov, V.N. Khomutov, R.K. Nasyrov // Holography: Advances and Modern Trends VI. – International Society for Optics and Photonics. – 2019. – Vol. 11030. – P. 110301C. DOI: 10.1117/12.2520960.
- [4] Белоусов, Д.А. Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой / Д.А. Белоусов, А.Г. Полешук, В.Н. Хомутов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, №. 5. – С. 678-686. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-678-686.
- [5] Белоусов, Д.А. Устройство для регистрации дифракционной картины синтезированных голограмм в широком угловом диапазоне / Д.А. Белоусов, А.Г. Полешук, В.Н. Хомутов // Автометрия. – 2018. – Т. 54, №. 2. – С. 35-42. DOI: 10.15372/AUT20180204.
- [6] Белоусов, Д.А. Метод характеристики фазовых и амплитудных дифракционных структур для задач мультипликации световых пучков / Д.А. Белоусов, Р.И. Куц, А.Е. Качкин, В.П. Корольков, В.В. Черкашин, А.С. Ельчин // Сборник материалов XVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «ИАМП-2022». – 2022.