



# "НАНОМЕТР НДГ-70" – ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЙ ДЛИННОМЕР

Б.Турухано, д.ф.-м.н., Н.Турухано, к.ф.-м.н., В.Добырин, к.т.н., Е.Кормин, В.Кормин /  
turuhan@pnpi.spb.ru

**Р**азработанные авторами методы синтеза апертуры интерференционного поля (ИП) в оптическом диапазоне и его фазовая модуляция для изготовления широкоапертурных прецизионных линейных голографических дифракционных решеток (ЛГДР) позволили увеличить точность ИП до 2 нм. Благодаря этому начато создание линейных измерительных систем с наноразрешением. На основе таких решеток впервые в мире изготовлен прибор "Нанометр НДГ-70" с разрешением в 1 нм. Близким аналогом является голографический длинномер SONY с разрешением 10 нм и с максимальной скоростью движения штока 120 мм/с.

Исследования материи в области наноразмеров за последние десятилетия приобрели остро направленный характер. Очевидно, что эти процессы коснутся всех областей деятельности человека, начиная с интеллектуальной и кончая промышленностью и экологией. Важным результатом таких процессов является, в частности, российский "Нанометр НДГ-70" с рекордным разрешением в 1 нм.

Синтез апертуры линейного ИП в оптическом диапазоне впервые реализован еще в 1977 году [1, 2]. Это позволило изготовить ЛГДР с рекордной равномерностью нанесения штрихов и частотой  $\nu = 1000$  штрихов/мм на длину более 1 м. Следует отметить, что при синтезе ЛГДР необходимо:

- для выбора коллимирующей оптики интерферометра и его оптимальной настройки контролировать с точностью до  $\sim \lambda/100$  равномерность фазового распределения интерференционного поля (ФРИП), в котором синтезируется ЛГДР;
- разработать метод изготовления ЛГДР по отдельному фрагменту ИП таким образом, чтобы результат соответствовал неограниченной длине такого фрагмента, скопированных в виде ЛГДР [1, 2];
- создать "двухчастотную фазовую модуляцию ИП" [3] с помощью пьезокерамической ячейки на частотах  $\omega$  и  $2\omega$ , что используется как при исследовании ФРИП, так и при синтезе ЛГДР неограниченной длины.

Результатом применения этих методов стала синтезированная ЛГДР длиной 1200 мм и частотой  $\nu = 1000$  мм<sup>-1</sup>. Для определения величины ошибок в таких ЛГДР несколько метровых решеток

были исследованы во ВНИИМ им. Д.И.Менделеева. Ошибка определена в виде:

$$\Delta S = \pm(0,02 + 0,4L) \text{ мкм},$$

где L – длина решетки в метрах. Следует отметить, что первый член выражения ( $\pm 0,02$ ) определяет случайную ошибку. Второй член этого выражения ( $\pm 0,4L$ ) создается систематическими ошибками и может быть уменьшен при совершенствовании процесса изготовления ЛГДР или учтен при измерениях.

На основе этих голографических решеток создан ряд наноизмерительных приборов линейных перемещений с разрешением 0,01 мкм. Приборы используются в России и за рубежом: в Белоруссии, Украине, США, Великобритании, Японии, Китае и в других странах.

Следует отметить, что синтез ЛГДР, копирование, аттестация и создание приборов на их основе защищены десятками патентов в ведущих промышленных странах. Однако авторам представляется, что потенциал их использования далеко не исчерпан, а они находятся лишь в начале пути.

Представленный прибор – голографический нанодлинномер "Нанометр НДГ-70" предназначен для измерения объектов длиной до 70 мм и относится к высокоточным измерительным системам линейных перемещений.

Основным измерительным элементом прибора, обеспечивающим его высокие характеристики, является высокоточная и равномерная ЛГДР с периодом

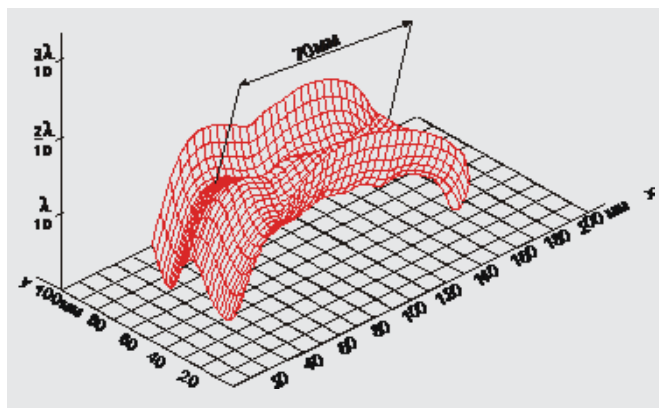


Рис.1. Фазовое распределение полос ИП двухлучевого адаптивного интерферометра при оптимальной настройке

в 1 мкм, синтезированная на автоматическом адаптивном голографическом интерферометре с двухчастотной динамической фазовой модуляцией [1-3]. Для этого (рис.1) использовался участок ИП длиной 70 мм. Фазовая карта ИП в его выходной плоскости показывает, что отклонение от идеального линейного распределения полос на центральном участке этой длины не превышает  $0,02\lambda$  [4].

Исследовано фазовое распределение штрихов в центральном сечении синтезированной ЛГДР, используемой в качестве измерительного элемента в "Нанометре НДГ-70" (рис.2). Измерение и обработка экспериментальных данных производились согласно методу исследования фазового распределения штрихов голографической решетки для однокоординатного случая [4]. Расчет такого распределения осуществляется по формуле:

$$\Phi_i^C = \sum_{k=1}^i \Delta\Psi_k - \frac{i}{N} \sum_{k=1}^N \Delta\Psi_k,$$

где  $\Delta\Psi_k$  – измеряемые экспериментально разности фаз между двумя фотоприемниками, установленными в выходной апертуре интерферометра. Полная ошибка выбранного и приведенного на рис.2 участка измерительной дифракционной решетки длиной 90 мм равна  $\pm 20$  нм.

Голографические измерительные системы, по сути, являются фотоэлектрическими преобразователями перемещений. Принцип их работы основан на модуляции света полупроводникового лазера в двухлучевом интерферометре, образованном двумя установленными с зазором дифракционными решетками.

Модуляция происходит при изменении разности фаз интерферирующих световых пучков

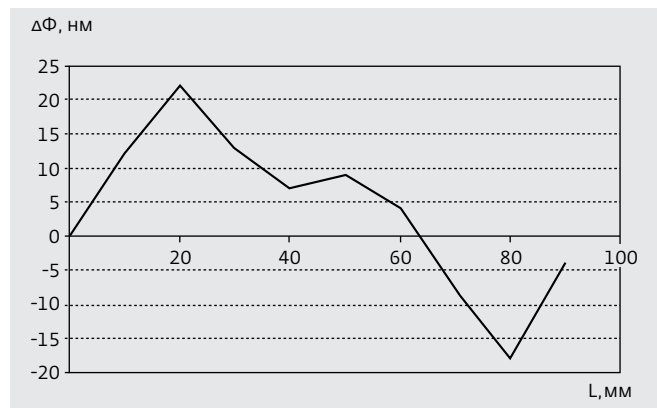


Рис.2. Фазовое распределение штрихов в центральном сечении синтезированной ЛГДР

при перемещении измерительной решетки относительно малой вспомогательной [5]. Шаг измерительной и вспомогательной решеток равен 1 мкм (1000 нм), поэтому для получения разрешения в 1 нм используются разработанные авторами электронная интерполяция и программное обеспечение для осуществляющих интерполяции микропроцессоров. Созданная электроника допускает работу "Нанометра НДГ-70" на скорости до 500 мм/с.

Однако для сохранения точности измерений на уровне нанометра необходимо, чтобы перемещение измерительной решетки осуществлялось вдоль некоторой оси, строго перпендикулярной к ее штрихам. Это представляет определенные требования к точности изготовления направляющих, по которым перемещается



Рис.3. Нанометр НДГ-70: под сапфировым шупом находится 5-мм концевая мера длины. Последняя цифра на экране ПК относится к единицам нанометра



измерительная решетка. Направляющая выполнена из двух склеенных под прямым углом стеклянных пластин, одна из которых является измерительной решеткой – ЛДГР [6]. Для изготовления пластин используется стекло, полученное методом "флюат-процесса" на расплавленном олове. В результате базовые поверхности направляющей становятся высококачественными. По этой причине муаровые полосы, которые образуются за решетками измерительной и второй индикаторной, сохраняют свой период и наклон, а точность измерений зависит только от качества измерительной решетки. В этом случае имеется возможность полностью реализовать точностные характеристики ЛДГР.

"Нанометр НДГ-70" характеризуется высокой надежностью и многофункциональностью [6, 7]. Он предназначен для прецизионных измерений перемещений в реальном масштабе времени, обработки и сохранения полученных результатов как при работе в автономном режиме и с автоматизированными системами, так и в составе измерительно-вычислительного комплекса.

Информация о величине перемещения отображается в виде таблиц и графиков. Прибор (рис. 3) может применяться для калибровки промышленных измерительных стандартов, высокоточного оборудования в метрологии, легко вписывается

в высокоточные системы с приводом с числовым программным управлением. "Нанометр НДГ-70" перспективен также при создании наноматериалов и в нанотехнологиях.

Авторы выражают искреннюю благодарность О.Ермоленко, Е.Вилкову, Н.Щипуновой, С.Ханову, Ю.Лаврову и Р.Синельщиковой за участие в работе и конструктивное обсуждение полученных результатов.

### Литература

1. Патент РФ №673018. Устройство для фазированного соединения голографических дифракционных решеток. По заявке №2497824 от 06 июня 1977 г.
2. Патент РФ №1656483. Голографическая дифракционная решетка, 1985 г.
3. Патент РФ №1452361. Способ стабилизации голографических установок, 1987 г.
4. Patent Germany 267892. Apparatus for assessing the linearity of a diffraction grating under certification, 1985 г.
5. Патент РФ 2032142. Микрометрическая головка "ТУБОР", 1995 г.
6. Турухано Б.Г., Турухано Н. Датчик линейных перемещений. Патент РФ №21977113, 27 января 2003 г.
7. Турухано Б.Г., Турухано Н., Вилков Е.А. Синтез апертуры интерференционного поля. – Компьютерная оптика, 2011, т.35, №2, с.145-150.

## НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена: 760 р.

### ЛАЗЕРЫ. ИСПОЛНЕНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ Айхлер Ю., Айхлер Г.И.

Перевод нового (7-го) издания базового учебника издательства "Шпрингер" по основам лазерной оптики содержит новейшие сведения о высокоэнергетических диодных и твердотельных лазерах для ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучений, рассмотрены волоконные лазеры, ультракороткие световые импульсы, рентгеновские лучи и световые импульсы от лазеров на свободных электронах, а также их применение в медицинской диагностике и биофотонике.

В книге затрагиваются следующие вопросы: функции, типы и свойства лазерного излучения, типы лазеров, оптические компоненты и управление лазерным излучением, применение лазеров в технологии обработки материалов, медицине, измерениях и передаче данных.

Простота и доступность изложения делает книгу прекрасным пособием не только для специалистов, но и для студентов и преподавателей профильных вузов.

МОСКВА:  
ТЕХНОСФЕРА, 2012. –  
496 с.  
ISBN: 978-5-94836-309-7

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 956-3346, 234-0110; ✉ [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)