

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



C 37  
C-655

25/8-76

P13 - 9831

Л.М.Сороко

4273/2-76

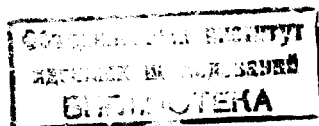
МНОГОВОЛНОВОЙ ОПТИЧЕСКИЙ ТЕНЕВОЙ ПРИБОР

**1976**

P13 - 9831

Л.М.Сороко

МНОГОВОЛНОВОЙ ОПТИЧЕСКИЙ ТЕНЕВОЙ ПРИБОР



Проблема измерения и контроля оптических неоднородностей в прозрачных или отражающих деталях экспериментальных установок всегда была и остается актуальной технической проблемой в физике и в технике изготовления узлов оптических и голографических устройств. Повсюду выдвигается требование высокой чувствительности метода, надежности в работе, простоты в обращении и стойкости к агрессивным средам. Существенным фактором является также простота интерпретации полученных данных. Всем этим требованиям отвечают теневые приборы, фильтры пространственных частот в которых имеют вид дифракционных решеток Гильберта <sup>/1-7/</sup>.

Теневой метод, предложенный Фуко и впервые использованный Теплером <sup>/8/</sup>, постепенно развиваясь, превратился в количественный метод. Существенную роль здесь сыграли работы Максудова <sup>/9-11/</sup>, в которых был предложен метод щели и нити в фокусе.

В теневых приборах, работающих по принципу расфокусированной диафрагмы, используются поглощающие решетки Ронки <sup>/12,13/</sup>. Решетка устанавливается на некотором расстоянии от плоскости пространственных частот теневого прибора. Лучи света, попадающие на ее непрозрачные участки, задерживаются. Если в плоскость объекта ввести оптические неоднородности, то тени от штрихов решетки изменяют свою регулярную структуру и смещаются на величину, определяемую локальной клиновидностью оптической неоднородности.

Достоинство метода расфокусированной диафрагмы состоит в простоте алгоритмов расшифровки получаемых данных об оптических неоднородностях. Недостаток метода расфокусированной диафрагмы состоит в том, что в нем имеет место поглощение света и каждый штрих решетки Ронки образует геометрическую тень. Это приводит к потере информации об объекте, которая составляет значительную величину. Чтобы уменьшить теряемую информацию, уменьшают коэффициент непрозрачности, равный отношению ширины поглощающей решетки Ронки к ее шагу. Однако это с неизбежностью ослабляет контраст изображения и создает неудобства, вызванные относительно большим расстоянием между тенями соседних штрихов.

В теновом приборе Уханова <sup>/15/</sup> реализуется метод измерения оптических аберраций независимо от их величины. Измерения производят при помощи узкого прямолинейного фазового экрана, который перемещается по полю зрения. Такой фазовый экран заменяет непрозрачную нить или щель в традиционных теневых приборах. Экран может состоять из сетки узких прямолинейных фазовых экранов постоянной или переменной ширины. Этим достигается высокая яркость и большой контраст получаемого изображения дифракционной полосы от фазового экрана или его края. Дифракционная полоса перемещается по полю зрения одновременно с перемещением экрана. При этом существенно, что сетка из узких фазовых экранов переменной ширины не выполняет функцию дифракционной решетки, и наблюдатель смотрит на прямое изображение, которое образуется на оптической оси в нулевом порядке дифракции. Наблюдаемые дифракционные полосы имеют высокий контраст и придают теновому прибору этой конструкции существенно более высокие характеристики, чем в системе с решетками Ронки.

Одним из недостатков тенового прибора Уханова является то, что высокий контраст дифракционной полосы невозможно получить одновременно для нескольких компонент в широкой спектральной области. Для того чтобы сохранить отмеченные выше достоинства прибора,

необходимо использовать по очереди различные фазовые экраны, согласованные с соответствующей длиной волны света.

Теория фазовых полос была опубликована Смигельским <sup>/14/</sup>, который, в частности, выполнил расчет расфокусированной диафрагмы с двумя фазовыми скачками в виде своеобразного фазового ножа. Несмотря на то, что система Уханова-Смигельского обладает простыми алгоритмами количественной интерпретации теневых фотографий, дает оптимальное использование пучка света и открывает возможность использования голографического метода, в литературе не была описана реализация тенового прибора с дефокусированной диафрагмой с двумя фазовыми скачками. Это можно объяснить трудностями реализации такой диафрагмы, а также сложностью юстировки по углу для получения максимального контраста темной полосы.

Сетка с узкими прямолинейными фазовыми экранами постоянной ширины отдаленно напоминает дифракционную решетку, однако не является таковой. Рубеж, отделяющий дифракционную решетку от множества других оптических элементов, не обладающих свойствами последней, но вызывающих процесс дифракции света, можно характеризовать параметром

$$d = \frac{L \lambda}{D}, \quad /1/$$

где  $L$  - расстояние между дифракционной решеткой и экраном наблюдения,  $D$  - диаметр апертуры или размер экрана, а  $\lambda$  - длина волны света.

Если решетка имеет шаг  $a$ , который удовлетворяет условию

$$a \ll d, \quad /2/$$

то дифракционные порядки разделяются на экране, и такой оптический элемент с периодической структурой называется дифракционной решеткой.

Если

$$a \gg d, \quad /3/$$

то дифракционные порядки не разделяются, и такой оптический элемент нельзя называть дифракционной решеткой.

Если изготовить сетку с узкими прямолинейными фазовыми экранами с шагом между фазовыми скачками настолько малым, что станет выполняться условие /2/, то дифракционные порядки у такой сетки разделяются в плоскости экрана, но одновременно с этим такая сетка с узкими фазовыми скачками перестанет визуализировать фазовые неоднородности объекта. Таким образом, как только сетка приобрела свойства дифракционной решетки, она перестала быть визуализирующей диафрагмой.

Отсюда следует вывод: расфокусированная диафрагма выполняет функцию визуализации фазовых объектов только в том случае, если процесс визуализации не связан с процессом дифракции света, приводящим к разделению дифракционных порядков. Это условие выполняется во всех известных теневых приборах, включая теневой прибор Ронки, Максутова и Уханова.

Перейдем теперь к описанию многоволнового оптического теневого прибора, разработанного автором совместно с Суетиным<sup>/15/</sup>. Принципиальная и конструктивная новизна этого теневого прибора, содержащего расфокусированную диафрагму, состоит в том, что эта последняя выполняет одновременно две функции, которые на первый взгляд кажутся взаимно несовместимыми. Во-первых, визуализация фазовых объектов происходит при помощи процесса дифракции света, который не приводит к пространственному разделению дифракционных порядков. Напомним, что это условие является необходимым для теневого прибора любой конструкции. Во-вторых, расфокусированная диафрагма разделяет в пространстве картины визуализации в двух и более спектральных линиях.

Совместить эти две функции в одном оптическом элементе можно, если использовать дифракционную решетку со сбиями. Линией сбоя называется участок дифракционной решетки, где расстояние между двумя соседними штрихами равно

$$a' = \frac{2k+1}{2} a, \quad /4/$$

где  $a'$  - шаг решетки, а  $k$  - целое число, обычно равное 0 или 1. При этом необходимо удовлетворить определенным количественным соотношениям между шагом дифракционной решетки и расстоянием между соседними линиями сбоя. А именно, шаг дифракционной решетки  $a'$  должен удовлетворять условию пространственного разделения дифракционных порядков /2/, а расстояние  $A$  между соседними линиями сбоя должно быть большим:

$$A \gg a. \quad /5/$$

При соблюдении условия /5/ процесс превращения фазового контраста в контраст интенсивности будет происходить внутри одного дифракционного порядка.

На рис. 1 приведена конструкция дифракционной решетки со многими сбиями, а на рис. 2 - схема самого теневого прибора. Принципиальной особенностью конструкции теневого прибора с расфокусированной диафрагмой в виде дифракционной решетки со многими сбиями является то, что, в отличие от близких и дальних

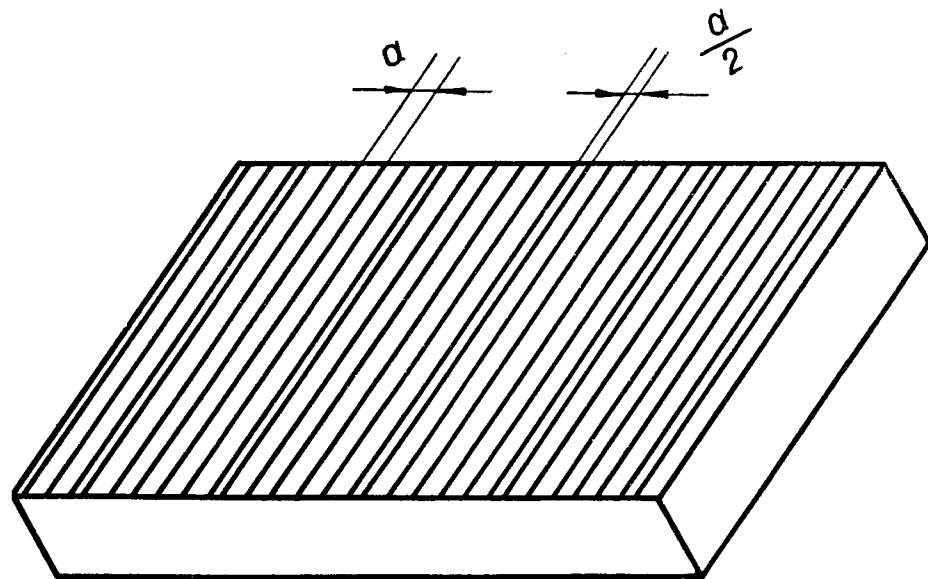


Рис. 1. Дифракционная решетка со многими сбиями.

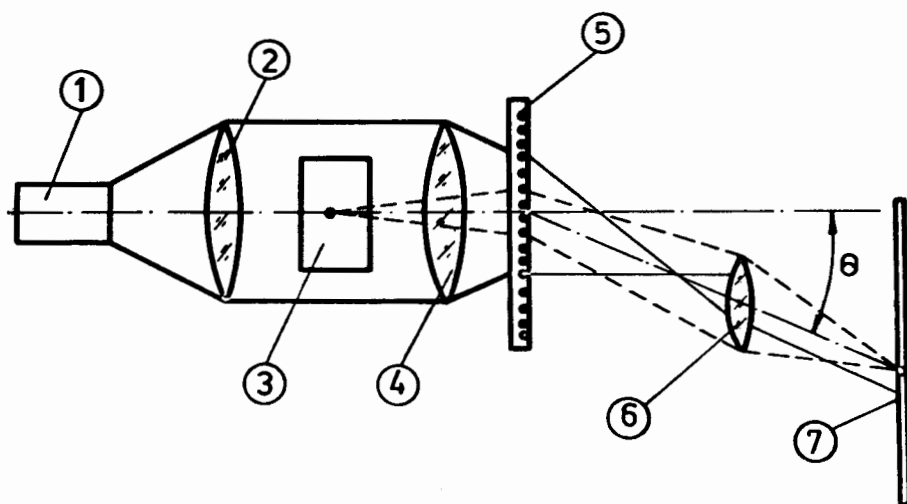


Рис. 2. Схема многоволнового оптического теневого прибора.

прототипов, визуализацию фазовой неоднородности ведут в первом, настоящем дифракционном порядке дифракции света на решетке как целом. При этом экран наблюдения расположен в направлении, образующем угол  $\theta$  с оптической осью, где

$$\theta \approx \frac{\lambda}{a}. \quad /6/$$

Для того чтобы одновременно выполнить условия пространственного разделения дифракционных порядков, а также визуализацию фазовых неоднородностей внутри одного дифракционного порядка, достаточно число штрихов решетки между двумя соседними линиями сбоя выбрать существенно больше 1

$$n \gg 1. \quad /7/$$

Так как расфокусированная диафрагма в теневых приборах этого класса располагается вне плоскости пространственных частот, то по принципу действия такие теневые приборы являются изображающими, а не пространственно спектральными. Отсюда вытекает главная

особенность любых конструкций расфокусированных диафрагм: все они содержат систему линий, штрихов или фазовых экранов. Расфокусированная диафрагма многоволнового теневого прибора содержит систему линий сбоя, "внедренную" в дифракционную решетку.

Основной функциональной особенностью многоволнового теневого прибора является одновременное отображение оптических неоднородностей в двух и более спектральных линиях. При этом для любой длины волны контраст изображения темных полос автоматически сохраняется предельно высоким.

Следует подчеркнуть, что дифракционную решетку с системой сбоя не может заменить комбинация из двух оптических элементов: сетки с узкими фазовыми экранами и дифракционная решетка, которые совмещены в одной плоскости. Для такой комбинированной расфокусированной диафрагмы контраст темных полос будет высоким только для одного участка спектра и к краям спектра спадает. Расфокусированная диафрагма в виде дифракционной решетки со многими сбоями отображает оптические неоднородности под различным углом к оптической оси системы в соответствии с длинами волн соответствующих спектральных компонент. При этом сдвиг фазы на линии сбоя для каждой спектральной компоненты всегда оказывается равным точно половине длины волны света.

Введение дифракционной решетки со многими сбоями в теневой прибор привело к изменению во взаимном расположении элементов теневого прибора с расфокусированной диафрагмой. А именно, экран наблюдения перенесен из нулевого порядка дифракции, как это имеет место во всех классических теневых приборах, в первый порядок дифракции света на решетке в целом.

На рис. 3 дана картина спокойного воздуха, пересеченная системой темных линий высокого контраста. Она получена в лучах гелий-неонового лазера при помощи экспериментальной дифракционной решетки со многими сбоями. Шаг решетки  $a = 10 \text{ мкм}$ , число штрихов между соседними линиями сбоя  $n \approx 130$ , а число линий сбоя в кадре равно 9. Никакой юстировки теневой прибор такой

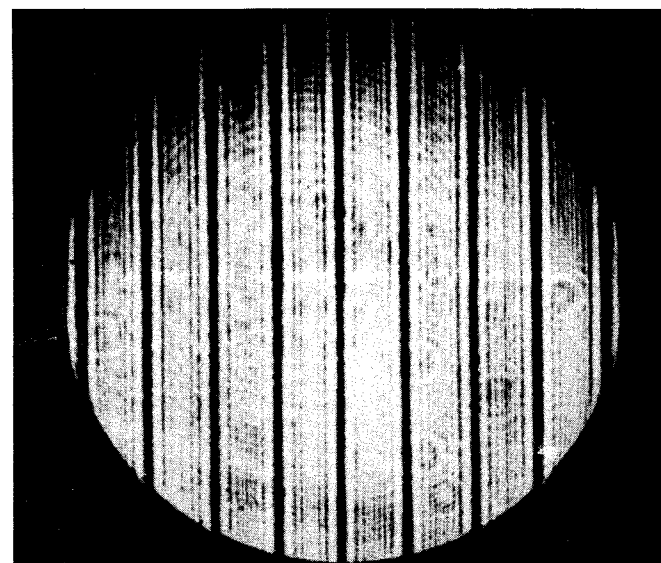
конструкции не требует. На *рис. 4* дана картина оптических неоднородностей "плохой" стеклянной шайбы. Благодаря высокому контрасту темные линии не заплывают, если время экспонирования сильно увеличить как на стадии получения негатива, так и на стадии фотопечати. Фотография на *рис. 5* получена при экспозиции, которая в 15 раз выше, чем для *рис. 4*.

На *рис. 6* дана картина полос для стеклянной пластинки, имеющей клиновидность. Угол клиновидности равен  $13 \cdot 10^{-4}$ , предельная чувствительность данной решетки составляет  $\approx 10^{-4}$  рад. При увеличении наклона стеклянной пластинки относительно плоскости решетки смещение линий возрастает. Существенно, что если фазовый сдвиг превышает угол  $360^\circ$ , то это можно обнаружить по величине сдвига крайней линии сбоя.

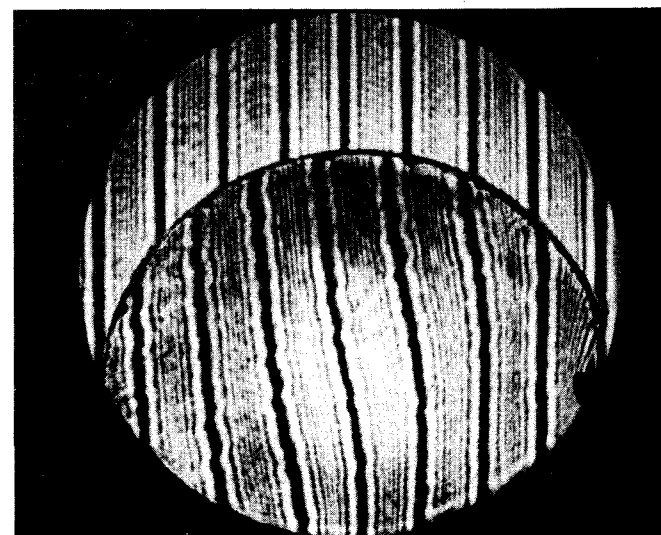
На *рис. 7* дана картина визуализирующих полос для объекта с большими оптическими дефектами - пластинки из плексигласа.

Теневой прибор новой конструкции обладает рядом второстепенных достоинств. Это - чистота изображений, получаемых в первом порядке дифракции, по сравнению с изображением в нулевом порядке; возможность работать в агрессивных средах; иммунитет расфокусированной диафрагмы к небрежному обращению; малая ширина переходной области на линиях сбоя решетки, а также строгая и постоянная прямолинейность темных линий.

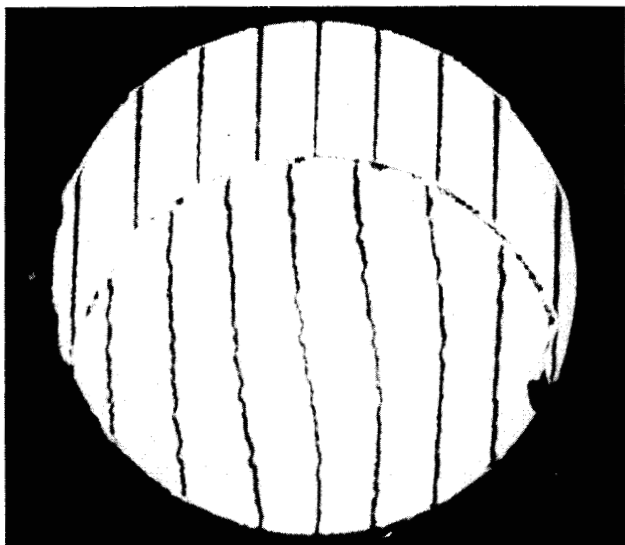
В заключение автор выражает признательность В.А.Суетину, изготовившему дифракционные решетки со сбоям и принявшему участие в экспериментах.



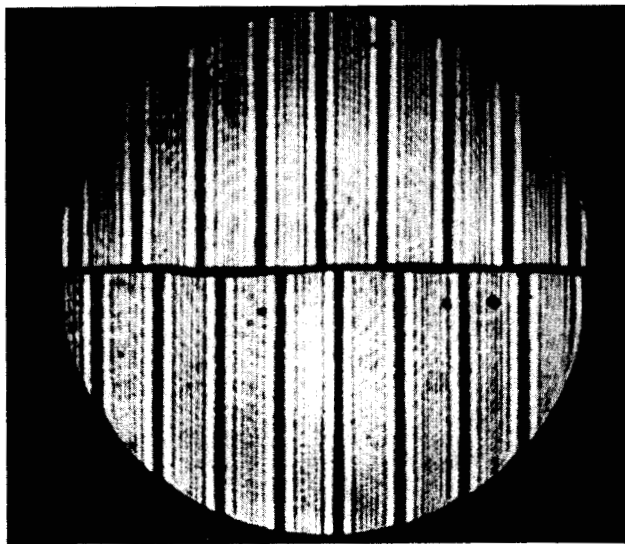
*Рис. 3. Картина спокойного воздуха, наблюдаемая при помощи дифракционной решетки со сбоем в направлении первого порядка дифракции.*



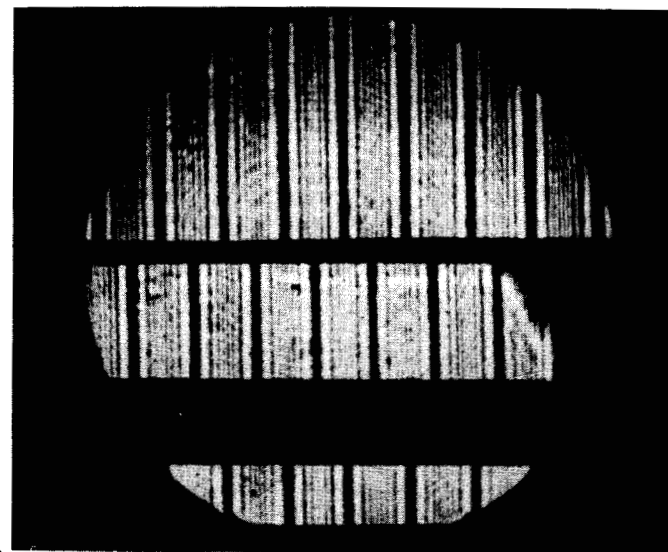
*Рис. 4. Оптические неоднородности стеклянной шайбы, наблюдаемые при помощи решетки со многими сбоями.*



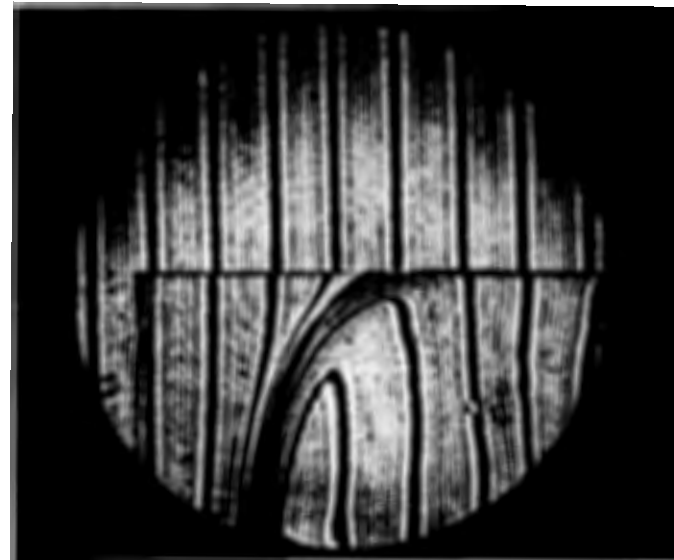
*Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но экспозиция в 15 раз больше.*



*Рис. 6. Клиновидность стеклянной пластинки, визуализируемая при помощи решетки со многими сбоями.*



*Рис. 7. Стеклянная пластина /см. рис. 6/ наклонена к плоскости экрана.*



*Рис. 8. Пластина из плексигласа с большими оптическими дефектами.*



## Литература

1. S.Lowenthal, Y.Belvaux. *Appl. Phys. Lett.*, 11, 49-51 /1967/.
2. Y.Belvaux, J.C.Vareille. *Nuov.Rev.Opt.Appl.*, 2, No. 3 /1971/.
3. Л.М.Сороко. Труды I Всесоюзной конференции по передаче информации лазерным излучением. Киев, 1969, стр. 176-191.
4. Л.М.Сороко. 5 Всесоюзн. школа по голографии. ЛИЯФ, 1973, 40-95.
5. Л.М.Сороко, В.А.Суетин. Сообщение ОИЯИ, P13-6565, Дубна, 1972.
6. Л.М.Сороко, Т.А.Стриж, В.А.Суетин. Сообщение ОИЯИ, P13-6607, Дубна, 1972.
7. Л.М.Сороко, В.А.Суетин. Авт. свид. №398910, Бюлл. изобр. №38, от 27.09.73.
8. А.Тоepler. *Beobachtungen nach einer Neuen Optischen Methode*. Bonn, 1864.
9. Д.Д.Максутов. Теневые методы исследования оптических систем. М., ГТТИ, 1934.
10. Д.Д.Максутов. Ж. опт.-мех.пром. №5, 1941.
11. Д.Д.Максутов. Теневые приборы. М.-Л., ГТТИ, 1935.
12. В.Ронки. Испытания оптических систем. М.-Л., ГТТИ, 1933.
13. Л.А.Васильев. Теневые методы. М., Наука, 1968, стр. 84.
14. P.Smigielski. *Optica Acta*, 1971, 18, No. 7, 483-506.
15. Л.М.Сороко, В.А.Суетин. Теневой прибор. Авт. свид. №512412. Бюлл. №16, 30.04.76.

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 июня 1976 года.