



14
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Ю.И. Левашов, И.А. Михальцова,
Ю.А. Пупков, М.Г. Федотов

ПРИБОР
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ
«ЛАЗЕРНАЯ СТРУНА»

ПРЕПРИНТ 91-19



НОВОСИБИРСК

Прибор для измерения непрямолинейности
«Лазерная струна»

Ю. И. Левашов, Ю. А. Пупков, М. Г. Федотов
Институт ядерной физики СО АН СССР

И. А. Михальцова
Институт автоматики и электрометрии СО АН СССР

АННОТАЦИЯ

В работе описан прибор для измерения непрямолинейности объектов длиной до 50 м в диапазоне ± 2 мм, созданный на основе нового оптического элемента - линзакона. Исследуются источники возможных погрешностей измерений прибором. Приведены результаты испытаний в лабораторных и производственных условиях.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач, которую предстоит решить при реализации проекта ВЛЭПП (Встречные линейные электрон-позитронные пучки), является прецизионная установка элементов его ускоряющей и магнитной систем на заданной прямой линии протяженностью в несколько километров [1]. Предварительными расчетами показано, что для получения необходимых параметров пучков в месте встречи их траектории должны проходить с отклонением от осей ускоряющих секций и магнитных квадрупольных линз не более единиц и долей микрометра соответственно. Инженерно-геодезическими методами обеспечивается юстировка элементов для первичной проводки настроечных пучков, затем предполагается производить окончательную подстройку по пучку.

Для предварительной выставки структуры ВЛЭПП нужен прибор, позволяющий измерять отклонения от прямолинейности с точностью ~ 20 мкм на 50 м длины. Измерения должны выполняться одновременно по двум координатам с автоматизированным снятием отсчетов. Аналогичные задачи существуют в инженерной геодезии и машиностроении (измерение отклонений от прямолинейности направляющих больших станков, координатных перемещений подвижных элементов машин и т. п.). Приборы с указанными характеристиками промышленностью не выпускаются. Существует ряд разработок и опытных образцов, у которых повторяемость отсчетов, составляющая часть ошибки измерения непрямолинейности, достигает $\sim 10+20$ мкм на 20 м длины [2].

Принципом работы ряда приборов для измерения непрямоли-

нейности является формирование в пространстве опорной световой линии, относительно которой определяются отклонения искоемых точек от прямой. Для формирования опорной линии используется либо коллимирование лазерного пучка, либо образование в нем на большом протяжении кольцевой интерференционной картины с ярким пятном в центре. Кольцевая структура пучка получается с помощью конических и сферических аксиконов [3, 4], круговых дифракционных решеток (дифракционных аксиконов) [5] и коллиматоров-интерферометров [6]. На основе последних построены лазерные центрирующие измерительные системы - ЛЦИС [7].

Недостатком ЛЦИС и устройств, использующих обычный коллимированный лазерный пучок [8], является то, что световая опорная линия имеет в поперечном сечении значительные размеры (от единиц до десятков миллиметров). Это создает трудности в надежном определении ее центра с высокой точностью. Напротив, с помощью аксиконов можно сформировать световую линию большой протяженности (до 100 м.) диаметром не более 1 мм.

До последнего времени широкое применение аксиконов любого типа сдерживалось, с одной стороны, трудностями изготовления стеклянных конусов с высокой точностью, с другой стороны, отсутствием специального оборудования и технологии для производства дифракционных аксиконов. Создание управляемых ЭВМ лазерных фотопостроителей [9], развитие термохимической технологии записи микроструктур лазерным пучком по хрому [10] и применение современной технологии фотолитографии позволяют в настоящее время изготавливать высокоточные образцы различных дифракционных оптических элементов и осуществлять их тиражирование.

В работе описан прибор «Лазерная струна», разработанный Институтом автоматики и электрометрии, Институтом ядерной физики и Научно-исследовательским институтом прикладной геодезии на основе нового дифракционного оптического элемента - линзаконна для решения задачи измерения непрямолинейностей на длине 50 м с точностью ~ 20 мкм.

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 1983 году сотрудниками ИАиЭ СО АН СССР были проведены исследования применимости киноформного аксикона (дифракционный аксикон с многоступенчатым профилем штрихов) [11] для контроля прямолинейности направляющих длиннобазовых станков. Излучатель, формирующий световую опорную линию, состоял из He-Ne лазера, коллиматора и аксикона со световым диаметром 40 мм. Длина световой линии в этих экспериментах была около 40 м, диаметр центрального пятна интерференционной картины изменялся от 50 мкм вблизи аксикона до 970 мкм в конце линии. В качестве отсчетного устройства использовался микроскоп. В условиях цеха без применения специальных мер для уменьшения влияния воздушных потоков точность наведения на центр пятна на расстоянии 18 м составила 32 мкм в вертикальном и 17 мкм в горизонтальном направлениях. Ограждение зоны измерения уменьшило эти значения до величин 13 и 9,5 мкм соответственно. В конце станины, на расстоянии 36 м от излучателя, максимальная погрешность наведения при условии частичной защиты области измерений от случайных воздушных потоков составила 40 мкм. Этот макет излучателя был взят за основу при разработке описываемого прибора. Для увеличения диапазона измерений до 50 м при условии обеспечения точности 20 мкм необходим аксикон со световым диаметром ~ 100 мм. Изготовить аксикон такого диаметра можно, но для его освещения требуется коллимирующий объектив с таким же световым диаметром, имеющий фокусное расстояние 300+400 мм. Это значительно увеличивает габариты и вес прибора. Указанный недостаток устранен заменой коллимирующего объектива и аксикона синтезированным в ИАиЭ новым дифракционным оптическим элементом, совмещающим их функции [12]. Как и линза, элемент обладает фокусом. При освещении его точечным монохроматическим источником, расположенным вблизи фокуса, в пространстве изображений вдоль оси элемента образуется световая линия, подобная световой линии аксикона. Авторы этого элемента назвали его линзаконном.

В качестве позиционно - чувствительного устройства

использован разработанный в ИЯФ блок регистрации центра пятна на основе ПЗС-матрицы.

2. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПРИБОРА «ЛАЗЕРНАЯ СТРУНА»

На рис. 1 приведена оптическая схема прибора, поясняющая принцип его действия. Излучение лазера 1 преобразуется коротко-фокусным 90-кратным объективом 2 в точечный источник света, расположенный вблизи фокуса линзаконна 3. За линзаконном образуется световая линия, направление которой задается положением источника и центра линзаконна. Распределение интенсивности в поперечном сечении линии представляет собой систему светлых и темных колец с ярким диском в центре и с хорошим приближением описывается квадратом функции Бесселя первого рода нулевого порядка от радиальной координаты. Интенсивность в центральном максимуме более чем в 6 раз превосходит интенсивность первого светлого кольца. Диаметр темного кольца, ограничивающего центральный максимум, определяет поперечный размер (диаметр) световой линии, являющейся реперной в данном приборе.

Позиционно-чувствительным устройством (ПЧУ) 4, устанавливаемым на реперной световой линии, является матричный фотоприемник на ПЗС-элементах с электронным блоком, формирующим увеличенное изображение картины колец на экране телевизора 5. ПЗС-матрица содержит 144×232 элемента с размерами 27×21 мкм. Определение координат x и y центра пятна производится наведением на него на экране телевизора подвижного репера-изображения в виде креста или рамки. Электронный блок выполнен таким образом, что смещение репера на один шаг, соответствует изменению его положения относительно ПЗС-матрицы на 10 мкм. На цифровом табло пульта управления 6 индицируется число шагов по направлениям x и y (координаты репера в десятках микрометров). Фотоприемный блок последовательно устанавливается на контролируемых точках, расположенных вдоль трассы, или закрепляется на каретке, движущейся по контролируемой поверхности. Диапазон измерений составляет ± 2 мм по обеим координатам.

Источником излучения в приборе является He-Ne лазер

ЛГН-213 с устойчивой модой генерации TEM_{00} и стабильностью оси диаграммы направленности (ОДН), характеризующейся величиной 10^{-4} рад. за 4 часа работы.

3. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЛИНЗАКОНА

При расчете линзаконна для прибора "Лазерная струна" исходными условиями являлись длина волны излучения $\lambda = 0.6328$ мкм, максимальный диапазон измерения $S = 50$ м и предельно допустимый диаметр световой реперной линии $\sigma = 500$ мкм.

Световая линия является множеством дифракционных изображений источника, построенных последовательными круговыми зонами линзаконна. Ее длина и диаметр зависят от конструктивных параметров линзаконна и расстояния между источником излучения и линзаконном. Если источник излучения находится точно в фокусе элемента, лучи, дифрагирующие в +1-ый порядок на круговых зонах разного радиуса, пересекают ось под одинаковым углом α , и изображение на расстоянии L строится круговой зоной со средним радиусом $\sim \alpha L$. В этом случае реперная линия имеет постоянный по всей длине диаметр $\sigma_0 = 0.766\lambda/\alpha$ и длину $S_0 = R/\alpha$ (R - радиус апертуры линзаконна). Приближая точечный источник к линзаконну выбранной апертуры, можно увеличить длину световой линии до заданной величины $S > S_0$. При этом диаметр световой линии будет линейно возрастать от величины σ_0 в начале, до величины $\sigma = 0.766\lambda S/R$ в конце линии.

Из этого соотношения был определен радиус апертуры элемента, при котором диаметр световой линии длиной 50 м не превышает 500 мкм. Линзаконн представляет собой круговую дифракционную решетку с уменьшающимся при удалении от центра периодом. Период на границе элемента приблизительно равен $\lambda f/2R$, где f - фокусное расстояние линзаконна. Чтобы иметь компактный, удобный в работе излучатель, фокусное расстояние желательно сделать меньше. Однако, существующие в процессе фотолитографического копирования ограничения не позволяют осуществить качественное тиражирование дифракционных элементов с размерами зон меньше 1.5 мкм. Это заставило остановиться на фокусном расстоянии, равном 300 мм.

Для расчета радиусов зон линзакон, кроме фокусного расстояния, необходимо задаться углом α (см. выше). Для получения более высокой точности измерения на длинах, существенно меньших 50 м, в расчет введен угол $\alpha=10^{-2}$, при котором $\sigma_0=50$ мкм и $S_0=5$ м.

Амплитудные линзакон с параметрами $R=50$ мм, $f=300$ мм и $\alpha=10^{-2}$ изготовлены в тонких пленках хрома на прецизионном лазерном фотопостроителе по технологии, описанной в [10]. Экспериментально была подтверждена возможность дальнейшего промышленного тиражирования линзакон обычным фотолитографическим способом. Топологию амплитудного линзакон можно перевести в стекло методами ионно-лучевого, плазменного или химического травления.

4. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИБОРА

Источниками инструментальных погрешностей прибора «Лазерная струна» могут быть погрешности изготовления линзакон, нестабильность оси диаграммы направленности (ОДН) лазерного излучения, погрешность определения координат центра пятна фотоприемным устройством.

Ошибки в записи дифракционных структур на лазерном фотопостроителе имеют как случайный, так и систематический характер. Максимальная погрешность записи характеризуется величиной ± 0.3 мкм. Если она проявится в нарушении концентричности кольцевых зон, это приведет к тому, что световая линия не будет прямой. Допустим, произошло смещение на величину ϵ центра группы зон, строящих дифракционное изображение источника на расстоянии L от линзакон (это зоны, лежащие внутри 1-ой зоны Френеля, имеющей форму кольца шириной $2\sqrt{\lambda L}$ со средним радиусом αL). Тогда поперечный сдвиг δ центра пятна в плоскости наблюдения на расстоянии L будет равен:

$$\delta = \frac{\epsilon(f+L)}{f} \approx \frac{\epsilon L}{f} \quad (1)$$

Нарушение концентричности будет сказываться не только на расстоянии L , но и на соседних участках линии по обе стороны от точки L , где отклонение от прямой будет плавно спадать до

нуля. Протяженность этой области составляет $2\sqrt{\lambda L}/\alpha$. Наибольшее отклонение от прямолинейности вызывается смещением центров крайних зон, формирующих наиболее удаленный участок линии. Из (1) видно, что на расстоянии 50 м отклонение световой линии от прямой может достигать 50 мкм.

Отступление формы зон от истинных окружностей приводит к нарушению круговой симметрии в распределении интенсивности в поперечном сечении линии и, следовательно, к неоднозначности определения положения центрального максимума. Используя критерий Релея, можно ограничить допустимые искажения формы зон величиной, равной одной четверти минимального периода элемента, d_{\min} . У линзакон $d_{\min}=3.8$ мкм, следовательно, допустимая величина искажений, составляющая ~ 0.9 мкм, втрое превосходит погрешность записи.

Пластина, несущая структуру линзакон, также может вносить искажения в световое распределение в линии. Отступления от плоскостности, асимметричные относительно центра структуры, и непараллельность поверхностей подложки вносят в дифракционную картину aberrации типа астигматизма. Было найдено, что несимметричность формы поверхностей больше $\lambda/20$ и непараллельность более $1'$ недопустимы. Элементы были изготовлены на пластинах, качество которых превышало эти требования.

Нестабильность ОДН лазера вызывает нестабильность пространственного положения опорной линии и может ухудшать качество картины колец в ее поперечном сечении. Оптическая система микрообъектив-линзакон ослабляет воздействие наклонов оси лазерного пучка на положение линии в пространстве в $N = f/f_{об}$ раз, где f и $f_{об}$ - фокусные расстояния линзакон и микрообъектива, соответственно. В приборе «Лазерная струна» $N = 150$ ($f_{об} = 2$ мм), поэтому уход оси пучка на 10^{-4} рад. за 4 часа работы приведет к отклонению световой линии на угол менее $0.7 \cdot 10^{-6}$ рад., при этом на расстоянии 50 м произойдет смещение пятна на 32 мкм.

Нарушения юстировки прибора из-за воздействия вибраций, колебаний температуры воздуха в помещении, нагрева узлов прибора тепловым излучением лазерной трубки также могут ска-

заться на стабильности и качестве опорной линии. Воздействие перечисленных выше факторов выявляется при исследовании прибора.

5. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИБОРА

Исследования прибора должны были ответить на следующие вопросы: является ли световая реперная линия прямой; какова временная стабильность ее пространственного положения; чему равна средняя квадратическая ошибка определения отклонений контролируемых точек от прямой линии и как влияют на нее внешние условия. Линзакон и прибор в целом исследовались отдельно.

Линзакон исследовался при освещении из фокуса, когда он формирует световую линию длиной 5 м. Это позволило проверить визуально картину распределения интенсивности на всем протяжении линии и оценить качество различных круговых зон линзакона от центра и до границы.

Проводилось также фотометрирование дифракционных изображений на различных расстояниях от линзакона. Как и предполагалось, высокие порядки дифракции не влияют на распределение интенсивности в поперечном сечении линии, т. к. отклоняются под большим углом к оси и за пределами расстояния от линзакона, равного f , уходят из поля интерференции. Это является важным преимуществом линзаконов по сравнению с дифракционными аксиконами, у которых этот эффект очень заметен [11]. Результаты фотометрирования, приведены на рис. 2, точками показаны значения функции $J_0^2(x)$, пересчитанные в масштабе записи. Незначительные отклонения в боковых максимумах объясняются влиянием паразитной интерференции и спекл-шумов.

Лабораторные испытания прибора проводились в помещении компаратора ИЯФ, на направляющих длиной 25 м. Температура в помещении поддерживалась постоянной с точностью $\pm 0.5^\circ\text{C}$, принимались меры по предотвращению движения воздуха. Направляющие отъюстированы вдоль прямой с точностью ± 0.2 мм. Прибор был настроен на длину 25 м. Диаметр светового пятна изменялся от 50 мкм в начале до 240 мкм в конце линии.

В этих условиях была определена точность наведения репера-креста на центр пятна на экране телевизора. Матричный фотоприемник устанавливался на геодезических знаках, расположенных вдоль направляющих с интервалом 2 м. Основание с приемником перемещалось до тех пор, пока центральное пятно не оказывалось примерно посередине экрана телевизора. Затем на центр пятна многократно наводился крест и снимались отсчеты. Измерения выполнялись в вертикальной и горизонтальной плоскостях. В результате проведенных исследований был сделан вывод, что при диаметре световой линии от 50 мкм до 240 мкм и расстояниях от излучателя от 2 м до 24 м точность наведения на центр изображения пятна на экране телевизора меньше или равна цене деления фотоприемника, т. е. ~ 10 мкм. В дальнейшем, при исследованиях прибора для получения более высокой точности применялся отсчетный микроскоп с окуляр-микрометром, имеющим цену деления 1 мкм. Микроскоп закреплялся на тележке, которая перемещалась и фиксировалась в определенных точках на направляющих.

Оценка точности наведения биссектора окуляр-микрометра на центр пятна была выполнена при различных расстояниях L от излучателя. Полученная по внутренней сходимости результатов многократных измерений средняя квадратическая ошибка наведения m хорошо аппроксимируется выражением:

$$m = [2 + 0.15 L(\text{м})] \text{ мкм.} \quad (2)$$

Слабая зависимость точности фиксирования центра пятна от расстояния до излучателя объясняется малыми размерами центрального максимума дифракционной картинки и его четкими границами.

Временная нестабильность пространственного положения световой линии исследовалась при расстоянии 25 м между излучателем и микроскопом. Излучатель и микроскоп закреплялись на противоположных концах направляющих и, после включения лазера, в течение 6 часов выполнялись серии измерений из 6 отсчетов с интервалом между сериями 20 мин положения центра пучка. На рис. 3 показано измеренное смещение Δ центра световой линии в зависимости от времени. Видно, что для выхода на стационарный режим требуется прогрев прибора около двух

часов. В последующее время уходы пучка незначительны ~ 10 мкм/час и почти линейны, что хорошо согласуется с предварительными расчетами (см. выше). Для уменьшения этой ошибки измерения нужно выполнять в прямом и обратном ходе и затем усреднять.

С учетом полученных результатов выполнено основное исследование прибора - проверка прямолинейности реперной линии посредством измерения отклонений направляющих от идеальной прямой при двух положениях линзаконна - исходном и повернутом на 180° относительно его оси. Методика заключается в следующем:

Результаты измерений отклонений направляющих от световой реперной линии приводятся к базовой прямой, соединяющей координаты первой и последней точек трассы. Приведенные значения прямолинейностей h_0 и h_n в этих точках равны нулю, а во всех других точках являются разностями:

$$h_i = a_i - \delta_i, \quad (3)$$

где i - номер точки (2, ..., $n-1$), a_i - измеряемые, приведенные к базовой прямой отклонения направляющих от световой линии в точке i , δ_i - определяемое отклонение световой линии от прямой. При повороте линзаконна на 180° вокруг его оси величина δ_i меняет знак на обратный, а h_i остается постоянным. Можно записать:

$$\delta_i = \frac{a_i^0 - a_i^{180}}{2}. \quad (4)$$

Измерения выполнялись в 13 дискретных точках направляющих, с интервалом между ними 2 м, по 10 отсчетов на каждой точке в прямом и обратном ходе. Это составляло один цикл измерений. Затем линзакон разворачивался на 180° и цикл измерений повторялся. Исследования в горизонтальной и вертикальной плоскостях проводились отдельно. На рис. 4 представлены результаты измерений величины δ_i , с указанием их средних квадратических ошибок m_δ , вычисленных с учетом (2) и (4).

Как видно из графика, все δ лежат в пределах $3m_\delta$, поэтому считаем, что линзакон изготовлен качественно и создает в

пространстве прямую опорную световую линию, отличающуюся от идеальной прямой не более чем на 10 мкм.

Методика измерений прямолинейности объектов при двух положениях линзаконна - прямом и повернутом на 180° исключает влияние погрешности его изготовления, приводящее к искривлению опорной световой линии. Но это удваивает число измерений и усложняет конструкцию прибора.

Из-за изменения планов строительства ВЛЭПП не нашлось подходящей галереи для испытаний прибора на длину 50 м. В помещении компаратора ИЯФ было проверено качество образуемых линзаконном картинок при настройке прибора на 50 м с использованием плоского зеркала и измерены диаметры центральных пятен в нескольких точках отрезка световой линии от 25 до 50 м. Центральное пятно и кольца имеют правильную круглую форму, их размеры соответствуют расчетным значениям.

6. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В цехе сборки крупногабаритных станков ПО «Тяжстанкогидропресс» г. Новосибирска прибором был измерен вертикальный профиль станины координатно-расточного станка длиной 25 метров. Излучатель неподвижно устанавливался на одном конце станины, а ПЧУ закреплялось на ползущке, которая перемещалась по станине с дискретностью 1 м. Высота оси пучка над поверхностью металла составила 0,15 м.

Не принимая специальных мер по ограждению области измерений от случайных воздушных потоков, работать с прибором в условиях цеха можно было лишь до 10 + 12 м от излучателя. На большем расстоянии дрожание изображения не позволяет уверенно брать отсчеты. На расстоянии 25 м случайные смещения центрального пятна по ПЗС-матрице составляли ± 0.2 мм по вертикали и ± 0.1 мм по горизонтали. Применение специального защитного кожуха позволило выполнить измерения на всей длине станины. Вертикальный профиль, построенный по измерениям прибором «Лазерная струна», показан на рис. 5 (кривая 1). Точность отсчета, по внутренней сходимости, составила $[10 + 0.5 L(m)]$ мкм.

Здесь же показан профиль станины, построенный по измерениям микроинвентаром (кривая 2). Расхождения результатов объясняются наличием в области прохождения световых лучей температурного градиента. После введения поправки за рефракцию по формулам, приведенным в [13] (пунктирная линия), различие результатов измерений микроинвентаром и прибором становится незначительным. Реально измеренные температурные градиенты в рабочей области достигали $1 \pm 3^\circ\text{C}/\text{м}$, что на порядок больше приводимых в работе [2] для аналогичных условий. Такие локальные градиенты возникают вблизи массивных объектов в нетермостатированных помещениях и существенно зависят от расстояния между лучом и измеряемой поверхностью. Этот фактор необходимо контролировать и учитывать при работе.

Производственные испытания показали, во-первых, работоспособность прибора, и, во-вторых, реальное влияние внешних условий на его точностные характеристики.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований и испытаний прибора "Лазерная струна" показали, что создан работоспособный прибор, позволяющий измерять в диапазоне ± 2 мкм отклонения от прямолинейности объектов протяженностью до 25 м с погрешностью, не превосходящей 10 мкм и $5 \div 7$ мкм на объектах длиной до ~ 10 м. Полученные ограничения по точности определяются влиянием внешних условий, которые при больших длинах становятся определяющими.

Прибор прост в изготовлении и эксплуатации, и может тиражироваться промышленностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Е. Балакин, А.В. Новохатский. Динамика пучка в линейном ускорителе ВЛЭПП. - Труды XIII Международной конференции по ускорителям частиц высокой энергии. Новосибирск, 1986; Новосибирск, 1987, т.1, с.146.
2. Ю.М. Голубовский, Н.И. Куликова, И.Ш. Эцин. Лазерные из-

мерители непрямолинейности в машиностроении. ОМП, 1989, N 1, с.20.

3. J.H. McLeod. The Axicon: A New Type of Optical Element. J. Opt. Soc. Am., 44 (1954), p.592.
4. W.H. Steel. Axicons With Special Surfaces.- Optics in Metrology. Pergamon Press, Oxford, London, New-York, Paris, 1960, p.181.
5. J. Dyson. Circular and Spiral Diffraction Gratings. Proc. Roy. Soc. (London) A248 (1958), p.93.
6. Е.Т. Вагнер и др. Лазерные и оптические методы контроля в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1977. 175с.
7. Е.Т. Вагнер. Лазеры в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1982, 182с.
8. Т. Pfeifer, М. Bambach, С. Schneider. Automatisierte Laserverfahren zur Durchführung Geometrischen Prüfungen an Maschinen.-Feinwerk-techn. + Messtechn., 1977, Bd.85, N 7.
9. В.М. Ведерников и др. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов. - Автометрия, 1981, N 3, с.3-17.
10. В.П. Коронкевич, А.Г. Полещук, Е.Г. Чурин, Ю.И. Юрлов. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома. - Квантовая электроника, 1985, т.12, N 4.
11. I.A. Mikhaltsova, V.T. Nalivaiko, I.S. Soldatenkow. Kinoform axicons Optik, 1984, Wd.67, N 3, p.267.
12. В.П. Корольков, В.П. Коронкевич, И.А. Михальцова и др. Киноформы: технологии, новые элементы и оптические системы.- Автометрия, 1989, N 4, с.47.
13. Г.Е. Рязанцев, А.М. Назаров. Приборы и методы угловых измерений при монтаже оборудования ускорителей (аналитический обзор), АИНФ460, М.: 1978, 88с. (ЦНИИАтоминформ).

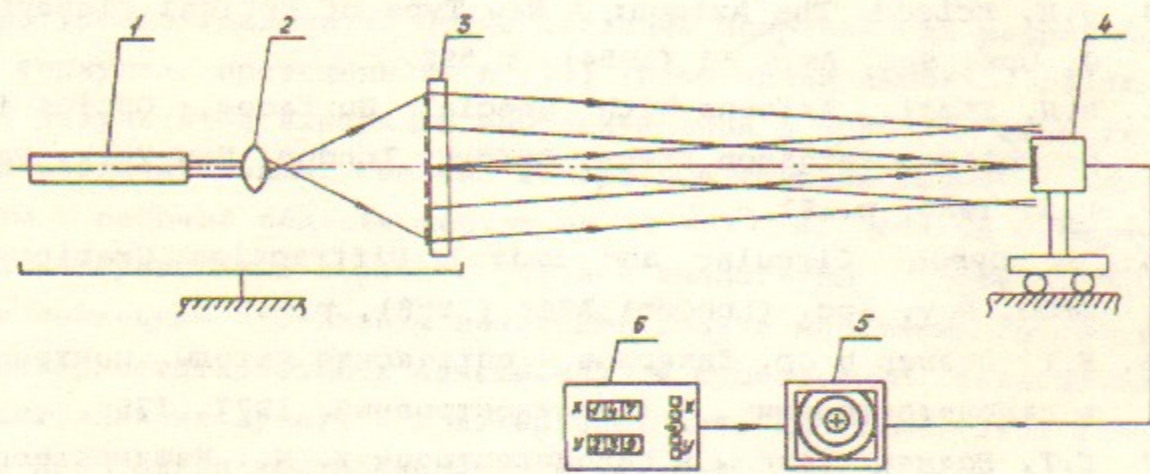


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема прибора "Лазерная струна".

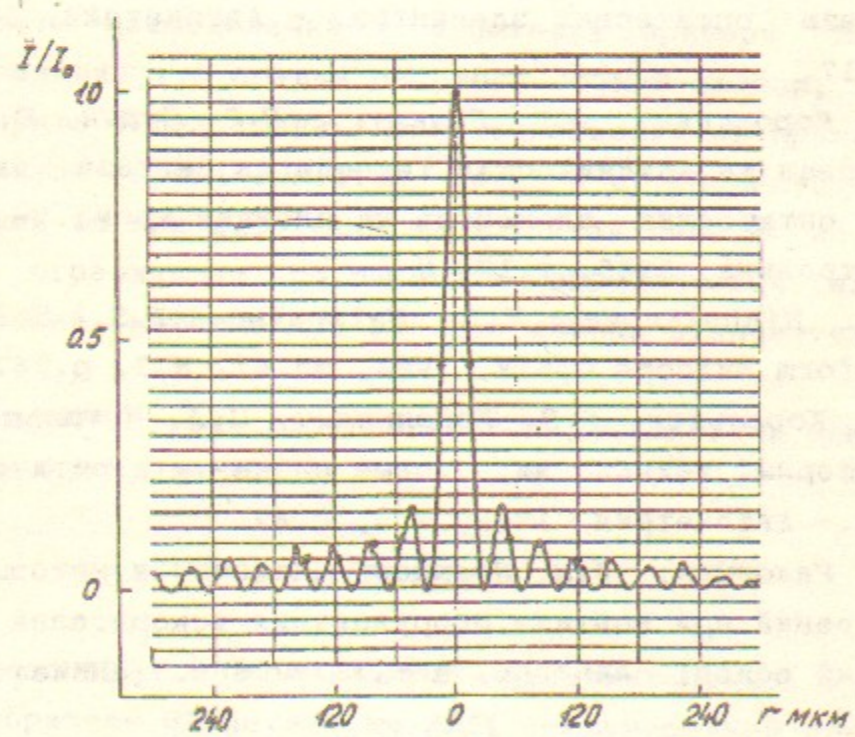


Рис. 2. Распределение интенсивности в поперечном сечении световой линии, образуемой линзой. Точками показаны значения функции $y = J_0^2(x)$.

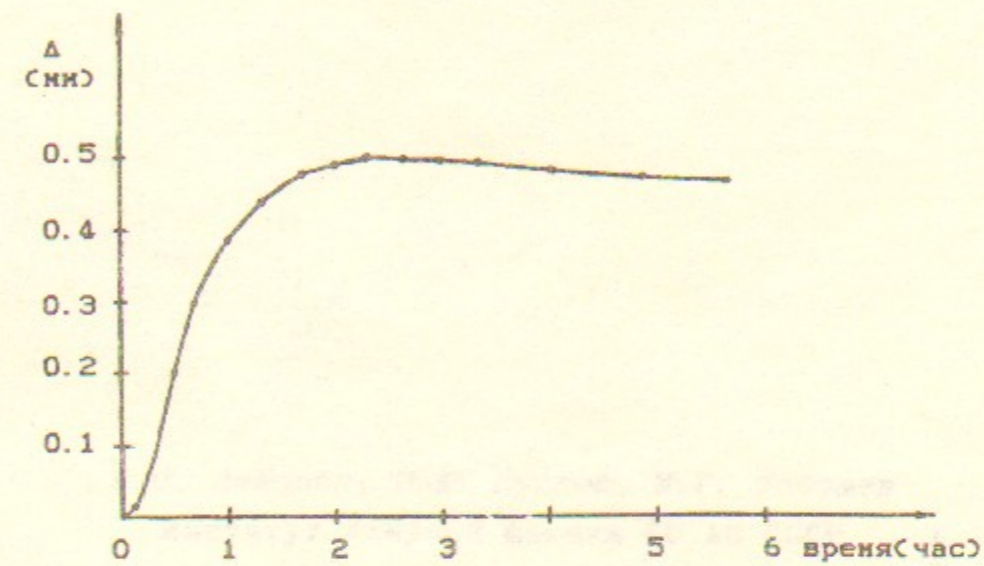


Рис. 3. Смещение центра световой линии 25 м длины при прогреве.

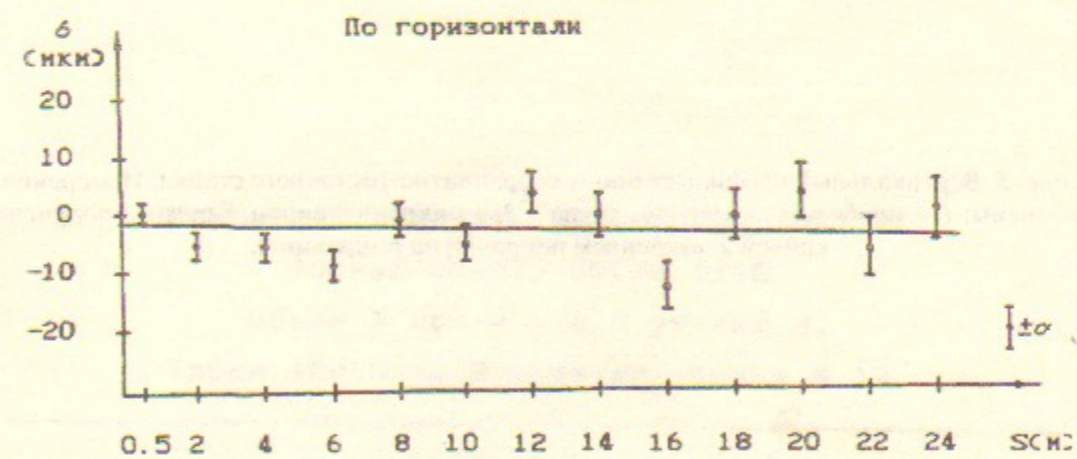
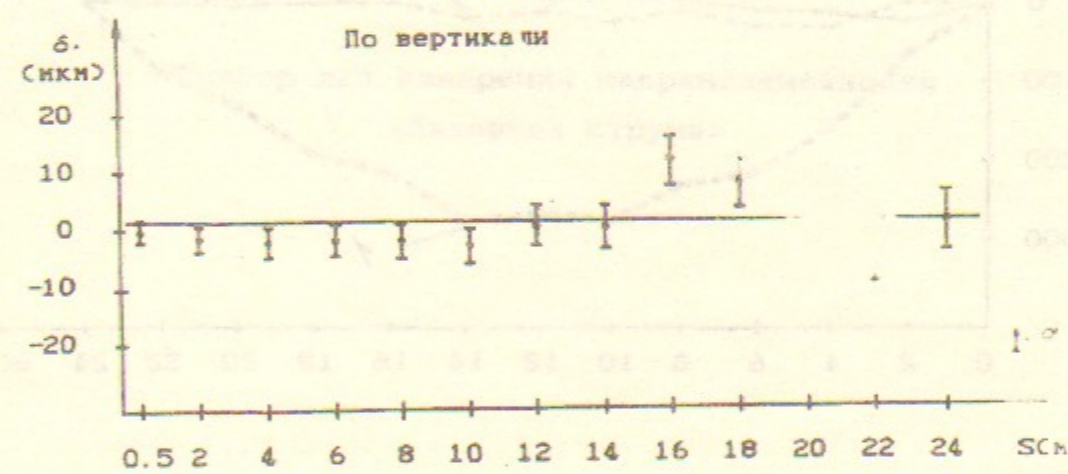


Рис. 4. Отклонения световой линии длиной 25 м от идеальной прямой.

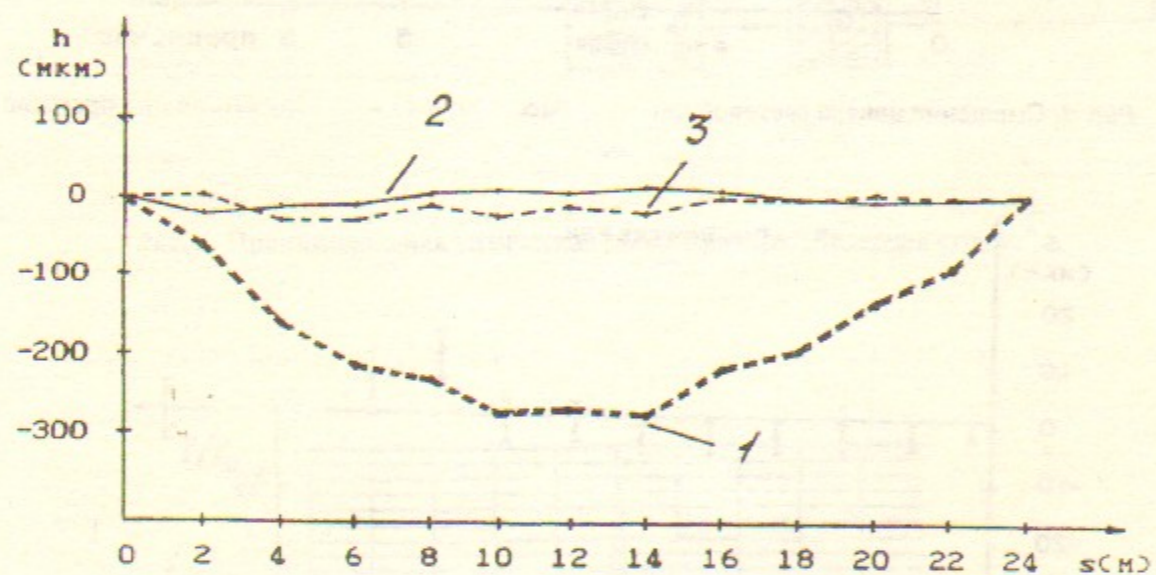


Рис. 5. Вертикальный профиль станины координатно-расточного станка. Измерения выполнены: 1 – прибором «Лазерная струна»; 2 – микроинвелеиrom. Кривая 3 получена из кривой 2 введением поправки на рефракцию.

Ю.И. Левашов, Ю.А. Пупков, М.Г. Федотов
Институт ядерной физики СО АН СССР

И.А. Михальцова
Институт автоматики и электрометрии СО АН СССР

Прибор для измерения непрямолинейности
«Лазерная струна»

Подписано в печать 21 февраля 1991 г.
Формат бумаги 60x90 1/16.
Объем 1 печ. л., 0,9 уч-изд. л.
Тираж 180 экз. Бесплатно. Заказ N 19.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г. Новосибирск, 90.