

ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ УГЛОВ КЛИНЬЕВ

Л.Н. Тимашова

ti64@yandex.ru

Н.Н. Кулакова

nnkulakova@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена оптико-электронная система лазерного интерферометра для контроля углов клиньев. Эта система регистрирует интерференционную картину на матричном приемнике излучения. Интерферометр позволяет оценить малый угол исследуемого клина по вносимому им изменению формы волнового фронта оптического излучения, что преобразуется интерферометром в изменение размера интерференционной картины. В рассматриваемом интерферометре исследуемый клин преломляет падающий на него пучок лучей. Погрешности обработки его поверхностей вызывают деформации рабочего волнового фронта примерно в 2–4 раз меньшие, по сравнению с известными схемами контроля, где поверхности клина работают на отражение. Разработанный интерферометр обеспечивает высокоточный контроль углов клиньев на стадии полировки поверхностей, включая возможность определения направления клина. При необходимости интерферометр можно использовать для комплексного контроля качества изготовления клина, оценить не только неплоскостность поверхностей, но и неоднородность стекла, а также использовать для контроля углов призм

Ключевые слова

Оптический клин, плоскопараллельная пластина, интерферометр, интерференционная картина, интерференционная полоса, оптико-электронная система, объектив, матричный приемник излучения, погрешность измерения, лазер

Поступила 20.05.2019

Принята 24.06.2019

© Автор(ы), 2020

Введение. Оптический клин (преломляющая призма с малым менее 6° углом преломления) применяется в оптических устройствах для измерения малых линейных или угловых смещений изображений путем перемещения его вдоль оптической оси или вращения перпендикулярно к оси. Вращающиеся оптические клинья в оптических системах используют в качестве компенсаторов при юстировке, для измерения или устранения малых линейных смещений или угловых отклонений. Часто клиновидность проявляется как ошибка, допущенная при изготовлении плоскопараллельных

пластин, которые применяются в качестве защитных светофильтров, сеток (пластинок с выгравированными на них шкалами), в интерферометрах в качестве эталонного и разделительного элементов. На рабочих чертежах плоскопараллельных пластин задают допуск на клиновидность θ , который определяет допустимую непараллельность между рабочими гранями пластины. Неточно изготовленная пластина практически является клином с малым преломляющим углом θ . Поэтому способы контроля пластин могут быть идентичны способам контроля оптических клиньев. Геометрические размеры выпускаемых оптических клиньев изменяются от 2 до 250 мм с точностью до 0,01 мм. Угловая точность до 5''.

Для определения качества клиновидных пластин необходимо получение одновременно информации о результатах измерения величины угла клина, качества поверхности клиновидной пластины и установления направления клина. Из большого разнообразия существующих оптических способов измерения и контроля угла клина прозрачных пластин интерференционные способы признаны наиболее полно отвечающими таким требованиям [1–7]. Интерферометр позволяет оценить малый угол исследуемого клина по внесимому им изменению формы волнового фронта оптического излучения, что преобразуется интерферометром в изменение конфигурации интерференционных полос. На точность измерения в таком приборе в значительной степени влияют погрешности, зависящие от качества изготовления поверхностей, приемника изображения и системы анализа измерительной информации. Современные матричные приемники изображения имеют высокую чувствительность и разрешение. Такие приемники необходимы при автоматизации оптических измерений, в том числе для ввода данных в компьютер [7–10]. Разработка оптических схем интерферометров с использованием матричных приемников излучения — это актуальная задача современного оптического производства.

Существует несколько интерференционных способов измерения угла клина. Самым простым является способ формирования интерференционных картин световыми пучками, отраженными от поверхностей клиновидной пластиной, либо при интерференции пучков лучей отклоненными клиновидной пластиной и отраженными от эталона [1–3]. Основные погрешности измерения обусловлены неплоскостностью поверхностей клина. Поэтому контроль и измерение этими способами проводятся только после полировки изделия.

Цель настоящей работы — разработка оптической схемы интерферометра для контроля углов клиньев с матричным приемником излучения. В рассматриваемом интерферометре исследуемый клин преломляет па-

дающий на него пучок лучей. Поэтому погрешности обработки его поверхностей вызывают уменьшенные в 2–4 раза деформации рабочего волнового фронта по сравнению с известными схемами контроля, где поверхности клина работают на отражение. Это полезное свойство схемы интерферометра вместе с матричным приемником излучения обеспечивает повышение точности контроля и его производительности. Такой интерферометр можно применять для высокоточного измерения углов клиньев в крупносерийном производстве.

Материалы и методы решения задачи. На рис. 1 приведена функциональная схема интерферометра для контроля углов клиньев. Схема включает в себя лазер, осветительную телескопическую систему, формирующую плоскую волну с равномерным распределением амплитуды $A_{\text{ОСВ}}(\lambda)$, блок из двух линз с параллельными оптическими осями, фурье-преобразующий объектив (ФПО), оптическая ось которого симметрично расположена относительно оптических осей линз, и матричный приемник излучения (МПИ).

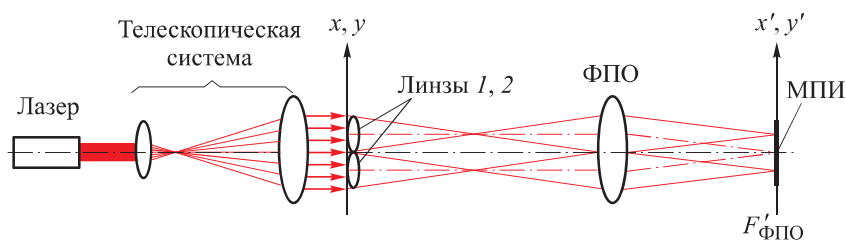


Рис. 1. Функциональная схема интерферометра

Перед началом исследований интерферометр настраивается без контролируемого клина. Схема формирования интерференционной картины без клина показана на рис. 2.

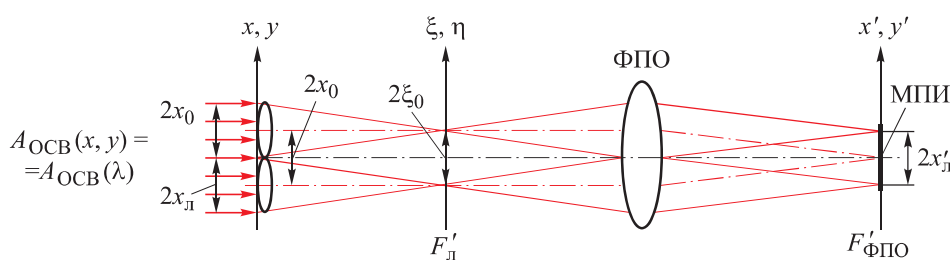


Рис. 2. Схема формирования интерференционной картины без клина

Коллимированный световой пучок, сформированный лазерным источником излучения и телескопической системой в осветительной ветви интерферометра, направляется на блок одинаковых положительных

линз 1, 2. Блок линз разделяет световой пучок на два волновых фронта: рабочий и эталонный. Эти волновые фронты фокусируются в задней фокальной плоскости линз $F'_л$, которая совмещена с передней фокальной плоскостью ФПО. Расстояние между образованными когерентными источниками излучения в совмещенных фокальных плоскостях равно $2\xi_0$. После преломления на ФПО рабочий и эталонный волновые фронты встречаются в его задней фокальной плоскости и интерферируют. Для регистрации интерференционной картины используется МПИ, который располагается в задней фокальной плоскости ФПО $F'_{\text{ФПО}}$. Интерференционная картина имеет вид прямых и равноотстоящих одна от другой полос в плоскости x', y' . Размеры зрачков линз $2x_л \times 2y_л$ и фокусное расстояние $f'_л$.

В задних фокальных плоскостях линз, расположенных в плоскости ξ, η , формируются два изображения точечных источников с амплитудой [11–14]:

$$\begin{aligned} A(\xi, \eta; \lambda) &= A_1(\xi, \eta; \lambda) + A_2(\xi, \eta; \lambda) = \\ &= \frac{A_{\text{ОСВ}} \cdot 2x_л \cdot 2y_л}{\lambda f'_л} \left[\sin c \left(\pi \cdot 2x_л \frac{\xi - \xi_0}{\lambda f'_л}, \pi \cdot 2y_л \frac{\eta}{\lambda f'_л} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \sin c \left(\pi \cdot 2x_л \frac{\xi + \xi_0}{\lambda f'_л}, \pi \cdot 2y_л \frac{\eta}{\lambda f'_л} \right) \right]. \end{aligned}$$

Расстояние между изображениями источников равно расстоянию между оптическими осями линз $2\xi_0 = 2x_0$.

Фурье-преобразующий объектив с фокусным расстоянием $f'_{\text{ФПО}}$ выполняет преобразование Фурье от распределения $A(\xi, \eta; \lambda)$ и в его задней фокальной плоскости формируется образованная в результате сложения двух пучков интерференционная картина с распределением амплитуды [11–14]:

$$\begin{aligned} A(x', y'; \lambda) &= \frac{A_{\text{ОСВ}}(\lambda)}{\beta} \left[\exp \left(-j \cdot 2\pi \frac{\xi_0 x'}{\lambda} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \exp \left(+j \cdot 2\pi \frac{\xi_0 x'}{\lambda f'_{\text{ФПО}}} \right) \right] \text{rect} \left(\frac{x'}{2x'_л}, \frac{y'}{2y'_л} \right) = \\ &= \frac{A_{\text{ОСВ}}(\lambda)}{\beta} \cdot 2 \cos \left(2\pi \frac{\xi_0 x'}{\lambda f'_{\text{ФПО}}} \right) \text{rect} \left(\frac{x'}{x'_л}, \frac{y'}{2y'_л} \right) = \\ &= \frac{A_{\text{ОСВ}}(\lambda)}{\beta} \cdot 2 \cos(2\pi v_\xi x') \text{rect} \left(\frac{x'}{2x'_л}, \frac{y'}{2y'_л} \right), \end{aligned}$$

где $\beta = f'_{\text{ФПО}}/f'_l$ — увеличение системы, образованной линзой и ФПО; $\nu_{\xi_0} = \xi_0/\lambda f'_{\text{ФПО}}$ — пространственная частота интерференционной картины.

Соответствующее распределение освещенности, регистрируемое МПИ [8–11]:

$$E(x', y'; \lambda) = \frac{E_{\text{ОСВ}}(\lambda)}{\beta^2} \cdot 4 \cos^2(2\pi \nu_{\xi_0} x') \operatorname{rect}\left(\frac{x'}{2x'_l}, \frac{y'}{2y'_l}\right).$$

Размеры интерференционной картины равны размерам изображения зрачков линз:

$$2x'_{\text{и.к}} \times 2y'_{\text{и.к}} = 2x'_l \times 2y'_l = (2x_l \times 2y_l) \frac{f'_{\text{ФПО}}}{f'_l}.$$

Размеры МПИ определяются размерами интерференционной картины:

$$a_{\text{МПИ}} \times b_{\text{МПИ}} = (2x_l \times 2y_l) \frac{f'_{\text{ФПО}}}{f'_l}.$$

При отсутствии клина число полос интерференционной картины будет максимальным:

$$N_{\text{max}} = 2x'_l \nu_{\xi_0} = 2f'_l \frac{\xi_0}{\lambda f'_{\text{ФПО}}}.$$

Контролируемый клин устанавливают в задней фокальной плоскости одной из линз (рис. 3).

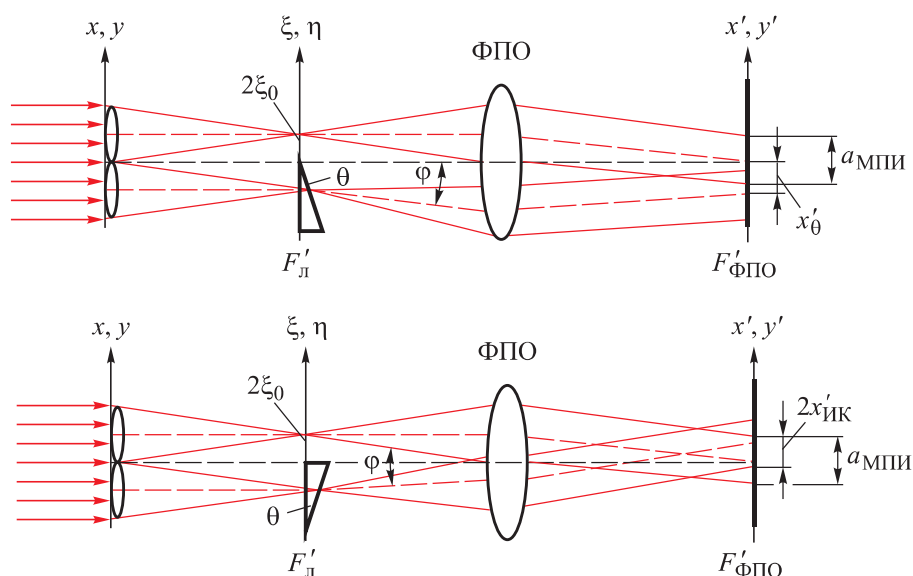


Рис. 3. Схема формирования интерференционной картины с контролируемым клином

При наличии клина с углом θ оптическая ось линзы отклоняется на угол

$$\Delta\varphi = \theta(n - 1),$$

область интерференции уменьшается на величину

$$x'_\theta = \varphi f'_{\text{ФПО}} = \theta(n - 1) f'_{\text{ФПО}}$$

и распределение амплитуды волны в плоскости ξ, η за клином запишется в виде

$$A(\xi, \eta; \lambda) = \frac{A_{\text{ОСВ}} \cdot 2x_{\text{л}} \cdot 2y_{\text{л}}}{\lambda f'_{\text{л}}} \left[\sin c \left(\pi \cdot 2x_{\text{л}} \frac{\xi - \xi_0}{\lambda f'_{\text{л}}}, \pi \cdot 2y_{\text{л}} \frac{\eta}{\lambda f'_{\text{л}}} \right) + \right. \\ \left. + \sin c \left(\pi \cdot 2x_{\text{л}} \frac{\xi + \xi_0}{\lambda f'_{\text{л}}}, \pi \cdot 2y_{\text{л}} \frac{\eta}{\lambda f'_{\text{л}}} \right) \exp \left(j \cdot 2\pi \frac{\Delta\varphi}{\lambda} \xi \right) \right].$$

В результате распределение амплитуды в задней фокальной плоскости ФПО будет иметь вид

$$A(x', y'; \lambda) = \frac{A_{\text{ОСВ}}(\lambda)}{\beta} \left[\exp \left(-j \cdot 2\pi \frac{\xi_0 x'}{\lambda f'_{\text{ФПО}}} \right) \text{rect} \left(\frac{x'}{2x'_{\text{л}}}, \frac{y'}{2y'_{\text{л}}} \right) + \right. \\ \left. + \exp \left(j \cdot 2\pi \frac{\xi_0 x'}{\lambda f'_{\text{ФПО}}} \right) \text{rect} \left(\frac{x' - x'_\theta}{2x'_{\text{л}}}, \frac{y'}{2y'_{\text{л}}} \right) \right] = \\ = \frac{A_{\text{ОСВ}}(\lambda)}{\beta} \left\{ \left[\exp \left(-j \cdot 2\pi \frac{\xi_0 x'}{\lambda f'_{\text{ФПО}}} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \exp \left(j \cdot 2\pi \frac{\xi_0 x'}{\lambda f'_{\text{ФПО}}} \right) \right] \text{rect} \left(\frac{x' - \frac{1}{2} x'_\theta}{2x'_{\text{л}} - x'_\theta}, \frac{y'}{2y'_{\text{л}}} \right) + \right. \\ \left. + \exp \left(j \cdot 2\pi \frac{\xi_0 x'}{\lambda f'_{\text{ФПО}}} \right) \text{rect} \left(\frac{x' - \frac{1}{2} x'_\theta}{2x'_{\text{л}} - x'_\theta}, \frac{y'}{2y'_{\text{л}}} \right) \right\}.$$

При наличии клина происходит смещение интерференционной картины в сторону основания клина и область интерференции уменьшается на величину

$$x'_\theta = \varphi f'_{\text{ФПО}} = \theta(n - 1) f'_{\text{ФПО}},$$

по знаку смещения полос можно определить знак угла клина (см. рис. 3). Соответствующее распределение освещенности запишем так:

$$E(x', y'; \lambda) = \frac{E_{\text{ОСВ}}(\lambda)}{\beta^2} \left[\text{rect} \left(\frac{x' - \frac{1}{2}x'_0}{x'_0} \right) + 4 \cos^2(2\pi\nu_{\xi_0}x') \text{rect} \left(\frac{x' - \frac{1}{2}x'_0}{2x'_n - x'_0}, \frac{y'}{2y'_n} \right) \right];$$

$$E(x', y'; \lambda) = \frac{E_{\text{ОСВ}}(\lambda)}{\beta^2} \left[\text{rect} \left(\frac{x' - \frac{1}{2}x'_0}{x'_0} \right) + 4 \cos^2(2\pi\nu_{\xi_0}x') \text{rect} \left(\frac{x' - \frac{1}{2}x'_0}{2x'_n - x'_0}, \frac{y'}{2y'_n} \right) \right].$$

Число полос в интерференционной картине уменьшится и станет равным

$$N_\theta = (2x'_n - x'_0)\nu_{\xi_0} = (2x'_n - x'_0) \frac{\xi_0}{\lambda f'_{\text{ФПО}}}.$$

Число полос интерференционной картины уменьшается на величину

$$\Delta N_\theta = x'_0 \frac{\xi_0}{\lambda f'_{\text{ФПО}}} = \theta(n-1)f'_{\text{ФПО}} \frac{\xi_0}{\lambda f'_{\text{ФПО}}} = \frac{\xi_0}{\lambda} \theta(n-1);$$

$$\Delta N_\theta = \frac{\xi_0}{\lambda} \theta(n-1).$$

Погрешность измерения угла клина $\delta\theta$ определяется при уменьшении числа полос интерференционной картины на одну полосу, т. е. при $\delta N = 1$. Угол клина измеряется с погрешностью $\delta\theta = \frac{\delta N \lambda}{(n-1)\xi_0}$. При минимальном числе полос $\delta N = 1$ погрешность измерения угла клина $\delta\theta = \frac{\lambda}{(n-1)\xi_0}$.

Минимальное регистрируемое смещение интерференционной картины равно одному элементу МПИ a_θ :

$$\delta x'_0 = \delta\theta(n-1)f'_{\text{ФПО}} = a_\theta.$$

Диапазон измеряемых углов определяется из условия $\Delta N = N_{\text{max}}$:

$$\Delta\theta = \frac{a_{\text{МПИ}}}{(n-1)f'_{\text{ФПО}}},$$

где $a_{\text{МПИ}}$ — размер МПИ.

Расчет погрешности измерения угла клина на интерферометре. Например, ОЭС имеет следующие параметры: формат МПИ $a_{\text{МПИ}} \times b_{\text{МПИ}} = 6,4 \times 4,8 \text{ мм}^2$; размер элемента МПИ $a_э = 2 \text{ мкм}$; длина волны лазера $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$; размер линзы $2x_{\text{л}} = 10 \text{ мм}$; период интерференционной картины $T_{\text{и.к}} = 10 a_э = 0,02 \text{ мм}$; фокусное расстояние ФПО $f'_{\text{ФПО}} = \xi_0 T_{\text{и.к}} / \lambda = 160 \text{ мм}$.

Фокусное расстояние линз должно быть $f'_{\text{л}} = f'_{\text{ФПО}} / \beta \approx 250 \text{ мм}$, где $\beta = a_{\text{МПИ}} / 2x_{\text{л}} = 0,64^{\times}$ — увеличение размера интерференционной картины.

Максимальное число полос интерференционной картины при отсутствии клина

$$N_{\text{max}} = 2x'_{\text{л}} \frac{\xi_0}{\lambda f'_{\text{ФПО}}} = 500.$$

Погрешность измерения угла клина при выбранных условиях будет равна

$$\delta\theta = \frac{x'_{\theta}}{(n-1)f'_{\text{ФПО}}} = 5'',$$

в диапазоне измеряемых углов

$$\Delta\theta = \frac{a_{\text{МПИ}}}{(n-1)f'_{\text{ФПО}}} \approx 4^{\circ}.$$

Как следует из приведенных формул, погрешность измерения может быть уменьшена при увеличении фокусного расстояния ФПО.

Обсуждение полученных результатов. Предложенная схема интерферометра позволяет измерять не только углы клиньев, но и углы призм, при использовании эталонной призмы (рис. 4).

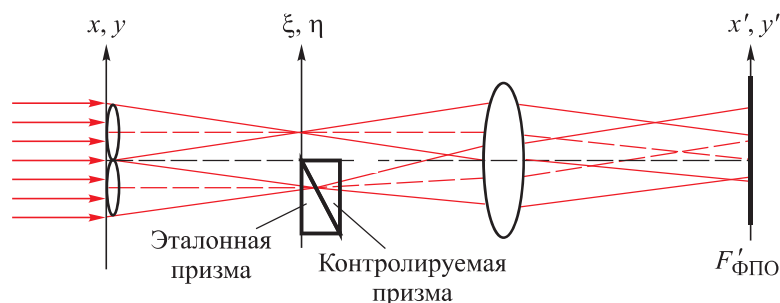


Рис. 4. Схема формирования интерференционной картины с контролируемой и эталонной призмами

Следует отметить, что абсолютно прямые интерференционные полосы возможны в случае равенства рабочего и эталонного волновых фронтов. При формировании рабочего волнового фронта происходит его искажение, вносимое клином. Поскольку угол клина мал (менее 6°), то для оценки этой волновой аберрации l_0 можно воспользоваться известной в теории аберраций третьего порядка формулой для плоскопараллельной пластины [15]:

$$l_0 = \frac{d}{8} \left(\frac{n^2 - 1}{n^3} \right) \sigma^4.$$

Здесь d — толщина пластины; n — показатель преломления; σ — апертурный угол пучка лучей. Заметим, что член $(n^2 - 1)/n^3$ имеет практически постоянное значение и меняется в небольших пределах: при изменении n от 1,4 до 1,9 его значения лежат в пределах 0,35–0,385. Поэтому в инженерных расчетах без ущерба для точности можно использовать формулу

$$l_0 \approx \frac{d}{20} \sigma^4.$$

Например, при $d = 20$ мм, $\sigma = 0,1$ из этой формулы получим $l_0 = 0,1$ мкм, что примерно равно $0,17\lambda$ ($\lambda = 0,6328$ мкм для He-Ne лазера). На основании этого можно утверждать, что при значениях апертурного угла $\sigma \leq 0,1$ искажениями интерференционных полос, вызванными аберрациями клина, можно пренебречь. Поэтому для повышения точности и достоверности контроля линзы 1 и 2 (см. рис. 1) должны иметь относительное отверстие $d/f' \leq 1:5$. В рассматриваемом интерферометре исследуемый клин преломляет падающий на него пучок лучей. Погрешности обработки его поверхностей вызывают деформации рабочего волнового фронта примерно в 2–4 раз меньшие, по сравнению со схемами контроля, где поверхности клина работают на отражение [1–3].

Заключение. Разработанный интерферометр обеспечивает высокоточный контроль углов клиньев, включая возможность определения направления клина. При необходимости интерферометр можно использовать для комплексного контроля качества изготовления клина, оценить не только неплоскостность поверхностей, но и неоднородность стекла, также интерферометр позволяет измерить углы призм при использовании эталонной призмы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. М., Машиностроение, 2004.
- [2] Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. М., Машиностроение, 1978.
- [3] Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М., Машиностроение, 1987.
- [4] Малакара Д., ред. Оптический производственный контроль. М., Машиностроение, 1985.
- [5] Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Ишанин Г.Г. и др. Оптические измерения. М., Логос, 2008.
- [6] Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. СПб., ИТМО, 2003.
- [7] Шредер Г., Трайбер Х. Техническая оптика. М., Техносфера, 2006.
- [8] Мишин С.В., Кулакова Н.Н., Тирасишин А.В. Адаптация алгоритма поиска координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки для работы с цифровым автоколлиматором. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2016, № 2, с. 117–124.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2016-2-117-124>
- [9] Тимашова Л.Н., Кулакова Н.Н., Сазонов В.Н. Оптико-электронная система для измерения сферической аберрации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2018, № 6, с. 112–122.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-112-122>
- [10] Кулакова Н.Н., Каледин С.Б., Сазонов В.Н. Анализ погрешностей измерения фокусного расстояния ИК-объективов гониометрическим методом. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Бауман. Сер. Приборостроение*, 2017, № 4, с. 17–26.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2017-4-17-26>
- [11] Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. Теория оптико-электронных систем. М., Машиностроение, 1990.
- [12] Якушенков Ю.Г., ред. Проектирование оптико-электронных приборов. М., Логос, 2000.
- [13] Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М., Логос, 2004.
- [14] Коротаев В.В. Расчет шумовой погрешности оптико-электронных приборов. СПб., ИТМО, 2012.
- [15] Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. СПб., Лань, 2008.

Тимашова Лариса Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Кулакова Надежда Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тимашова Л.Н., Кулакова Н.Н. Интерферометр для контроля углов клиньев. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 2, с. 117–129. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-2-117-129>

INTERFEROMETER TO CONTROL WEDGE ANGLES

L.N. Timashova

ti64@yandex.ru

N.N. Kulakova

nnkulakova@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers an optoelectronic laser interferometer system to control wedge angles. This system records an interference pattern on an image sensor. The interferometer makes it possible to estimate the small angle of the wedge under investigation by the variation it introduces into the shape of the optical radiation wavefront, which the interferometer then converts into changing the size of the interference pattern. In the interferometer considered, the wedge under investigation refracts the incident ray cone. The error inherent in surface finishing causes the deformation of the working wavefront to be 2 to 4 times smaller as compared to the deformation in previously known control setups involving reflection from the wedge surfaces. The interferometer developed ensures highly accurate control of wedge angles at the surface polishing stage, including potential detection of wedge direction. If required, the interferometer may be used for comprehensive quality control of wedge manufacturing, assessing not only the surface nonplanarity, but also glass inhomogeneity; it may also be used to control prism angles

Keywords

Optical wedge, planar wafer, interferometer, interference pattern, interference fringe, optoelectronic system, objective lens, image sensor, measurement error, laser

Received 20.05.2019

Accepted 24.06.2019

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Krivoviyaz L.M., Puryaev D.T., Znamenskaya M.A. *Praktika opticheskoy izmeritel'noy laboratorii* [Practice of optical measuring laboratory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004.
- [2] Kreopalova G.V., Puryaev D.T. *Issledovanie i kontrol' opticheskikh system* [Study and control on optical systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978.
- [3] Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987.
- [4] Malacara D. *Optical shop testing*. Wiley, 2007.
- [5] Andreev A.N., Gavrilov E.V., Ishanin G.G., et al. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Logos Publ., 2008.
- [6] Kirillovskiy V.K. *Opticheskie izmereniya. Ch. 2. Teoriya chuvstvitel'nosti opticheskikh izmeritel'nykh navodok. Rol' opticheskogo izobrazheniya* [Optical measurements. P. 2. Sensitivity theory of optical measuring sighting. Role of optical image]. St. Petersburg, ITMO Publ., 2003.
- [7] Schröder G., Treiber H. *Technische optik: Grundlagen und Anwendungen*. Vogel, 2002.
- [8] Mishin S.V., Kulakova N.N., Tirasishin A.V. Adaptation of the algorithm for searching the coordinates of the energy centre in the image of an autocollimating point for working with digital autocollimator. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 2, pp. 117–124 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2016-2-117-124>
- [9] Timashova L.N., Kulakova N.N., Sazonov V.N. Opto-electronic system for measurement of spherical aberration. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 6, pp. 112–122 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2018-2-112-122>
- [10] Kulakova N.N., Kaledin S.B., Sazonov V.N. Error analysis of IR lens focal length measured by a goniometric method. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 4, pp. 17–26 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2017-4-17-26>
- [11] Mosyagin G.M., Nemtinov V.B., Lebedev E.N. *Teoriya optiko-elektronnykh system* [Theory of optical electronic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990.
- [12] Yakushenkov Yu.G., ed. *Proektirovanie optiko-elektronnykh priborov* [Design of optical electronic devices]. Moscow, Logos Publ., 2000.
- [13] Yakushenkov Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov* [Theory and calculation of optical electronic devices]. Moscow, Logos Publ., 2004.
- [14] Korotaev V.V. *Raschet shumovoy pogreshnosti optiko-elektronnykh priborov* [Calculation of noise error of optical electronic devices]. St. Petersburg, ITMO Publ., 2012.
- [15] Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. *Teoriya opticheskikh system* [Theory of optical systems]. St. Petersburg, Lan Publ., 2008.

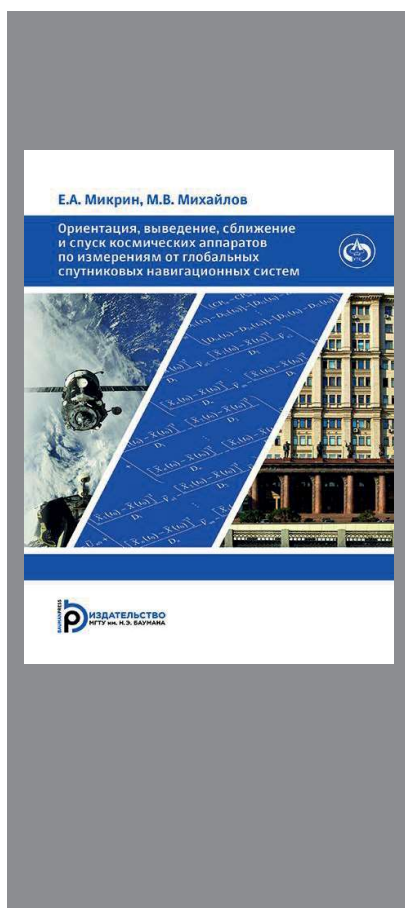
Timashova L.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Opto-electronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kulakova N.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Opto-electronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Timashova L.N., Kulakova N.N. Interferometer to control wedge angles. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 2, pp. 117–129 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-2-117-129>



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов

Е.А. Микрина, М.В. Михайлова

**«Ориентация, выведение, сближение
и спуск космических аппаратов
по измерениям от глобальных
спутниковых навигационных систем»**

Рассмотрены задачи координатно-временного обеспечения космического аппарата, решаемые аппаратурой спутниковой навигации, а именно: формирование бортовой шкалы времени; определение ориентации; навигация при сближении и спуске космического аппарата в атмосфере, а также навигация средств выведения.

Для студентов и аспирантов авиа- и ракетостроительных специальностей высших технических учебных заведений, научных работников и инженеров, занимающихся разработкой, проектированием и испытаниями навигационных систем космических аппаратов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

+7 (499) 263-60-45

press@bmstu.ru

<http://baumanpress.ru>