

В. С. ГОНЯЕВ, В. А. ФРОЛЕНКО, Н. П. ШЕСТАКОВ, А. П. ШЕШУКОВ  
(Красноярск)

## БЕСКОНТАКТНЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ПРОФИЛОГРАФ

**Введение.** Бесконтактные интерференционные методы контроля качества обработки полированных поверхностей обладают преимуществами по сравнению со шуповыми методами [1]. Однако реализация этих методик фокусировки лазерного луча, но из-за aberrации реальных объективов минимальный диаметр светового пятна составляет величину 10—50 мкм. Путем дополнительного диафрагмирования излучения на выходе фокусирующего объектива [2] удается уменьшить площадь зондируемого участка поверхности до 2 мкм. При этом, однако, сканирование осуществляется механически путем перемещения образца. Ряд требований предъявляется и к сканирующему устройству. Точность позиционирования и равномерность движения определяются разрешающей способностью прибора, а вертикальные смещения образца при позиционировании — глубиной резкости объектива. Создание такого устройства — довольно сложная задача.

В данной работе описан действующий макет интерференционного профилографа с пространственной разрешающей способностью 2 мкм по горизонтали и точностью  $\pm 0,5$  нм по вертикали. Профилограф предназначен для измерения профиля исследуемой поверхности и автоматического вычисления параметров ее шероховатости [3].

**Принцип действия.** Оптическая схема профилографа представлена на рис. 1. Она построена на основе интерферометра с наклонным падением лучей, разность хода которых модулируется по синусоидальному закону. Узлы оптической схемы профилографа смонтированы на жесткой металлической плите, виброизолированной с помощью резиновых камер. Принцип действия регистрирующей системы основан на измерении сдвига интерференционных полос с помощью модифицированного [4] метода временных интервалов [5].

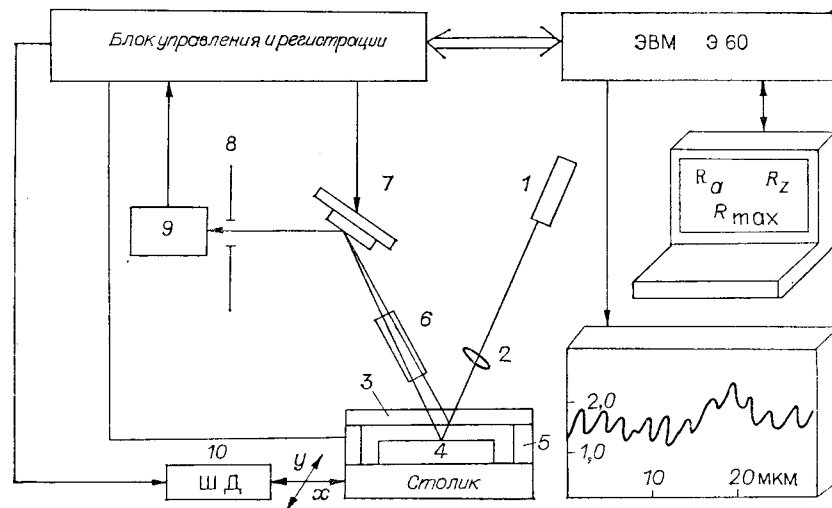


Рис. 1. Схема бесконтактного интерференционного профилографа

Излучение одночастотного лазера 1 фокусируется линзой 2 через прозрачную эталонную пластину 3 на исследуемую поверхность образца 4. Эталонная пластина прикреплена к пьезокерамическому модулятору 5. Лучи света, отраженные от внутренней поверхности эталонной пластины и контролируемой поверхности образца, проецируются микроскопом 6 на оптический дефлектор 7. Отраженные от оптического дефлектора. Изменение углового положения отражателя приводит к смещению изображения относительно фотоприемника (ФЭУ-79) 9, входная апертура которого ограничена диафрагмой. Таким образом осуществляется сканирование изображения в пределах освещенной части поля зрения микроскопа.

Чтобы обеспечить разрешающую способность 1—2 мкм, размер диафрагмы и коэффициент увеличения микроскопа подбираются из условия  $d < BK$ , где  $d$  — размер диафрагмы;  $B = 1—2$  мкм — разрешающая способность;  $K$  — коэффициент увеличения микроскопа. Поскольку изображение исследуемой поверхности на выходе микроскопа увеличено в  $K$  раз, то соответственно уменьшаются требования к точности сканирования изображения оптическим дефлектором.

Для исключения паразитной интерференции, обусловленной отражениями света от оптических элементов, применена нецентрированная оптическая система, а эталонная поверхность имеет непараллельные поверхности. Соответствующие углы отклонения оптических осей линзы и микроскопа от осевого пучка лучей незначительно превышают угол расходимости лазерного излучения, поэтому возникающие aberrации не приводят к заметным искажениям изображения.

Профилограмма автоматически измеряется в нескольких участках исследуемой поверхности, для этого интерферометр, образованный эталоном и образцом, установлен на двухкоординатном столике и программно перемещается шаговыми двигателями 10 в плоскости  $x, y$ .

Наклонное падение лучей приводит к потере резкости изображения контролируемой поверхности по одной из координат  $x$ , тогда как по другой координате  $y$  этого не происходит, поскольку ось  $y$  параллельна линии пересечения фокальной плоскости микроскопа с плоскостью контролируемой поверхности. Прецизионное сканирование изображения интерферограммы поверхности в пределах поля зрения микроскопа осуществляется в направлении  $y$  оптическим дефлектором относительно входной диафрагмы фотоприемника.

Профилограф может быть использован для профилографирования лишь хорошо обработанных поверхностей (13, 14-й классы), так как для более грубо обработанных поверхностей ухудшается контраст интерференционной картины. В соответствии с [3] для 13, 14-х классов чистоты базовая длина, на которой производится нормировка шероховатости, составляет 80 мкм, поэтому размер освещенной площади на исследуемой поверхности должен быть, по крайней мере, не меньше этой величины. В качестве источника излучения использовался промышленный одночастотный He-Ne-лазер мощностью 0,25 мВт, позволивший получить удовлетворительное отношение сигнал/шум на трассе профилографирования длиной 80 мкм. Практически в установке может быть использован и нестабилизированный He-Ne-лазер, имеющий относительную нестабильность частоты  $10^{-4}—10^{-5}$ , что соответственно ограничит точность измерения высоты неровностей.

Блок управления и регистрации является интерфейсным блоком, обеспечивающим связь с микроЭВМ «Электроника 60». Блок состоит из модуля управления шаговыми двигателями, устройства для измерения

сдвига интерференционных полос [4] и модуля управления оптическим дефлектором. Модуль управления шаговыми двигателями предназначен для программного перемещения образца относительно лазерного луча. В устройстве для измерения сдвига интерференционных полос формируется синусоидальное напряжение управления пьезокерамикой, производятся аналоговая обработка интерференционного сигнала и преобразование сдвига интерференционных полос в цифровой код. Соответственно модуль управления оптическим дефлектором формирует сигналы управления поворотом отражателя.

Измерения сдвига интерференционных полос осуществляются следующим образом. На пьезокерамический модулятор подается синусоидальное напряжение, позволяющее раскачивать эталон вдоль оси  $z$  с амплитудой  $\sim 4\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения лазера. С небольшим запаздыванием, обусловленным инертностью механической системы, модулятор сканирует разность хода интерферометра по синусоидальному закону (рис. 2, а), в результате чего на фотоприемник поступает модулированный сигнал (рис. 2, б). Интервал времени  $\tau$  между опорным импульсом (рис. 2, в) и импульсом (рис. 2, г) заполняется тактовой частотой. Таким образом, формируется пакет импульсов (рис. 2, д), число которых пропорционально временному интервалу  $\tau$ . Число импульсов в пакете  $a(i, k)$  записывается в память микроЭВМ в каждой точке профилограммы и может принимать значения от 0 до  $\lambda/2$ . Перед началом измерений, кроме синусоидального напряжения, на пьезокерамический модулятор подается линейно возрастающее напряжение с амплитудой, достаточной для изменения разности хода на величину более  $\lambda/2$ , при этом ЭВМ запоминает все полученные данные  $a(i, k)$ , находит максимальное значение, которое пропорционально  $\lambda/2$ . Эта процедура служит для калибровки и позволяет получать профилограммы и параметры шероховатости непосредственно в микрометрах.

В процессе измерений сдвиг интерференционных полос может составлять величину  $n\lambda/2$ , где  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , поэтому возникает необходимость реверсивного отсчета целых и дробных долей интерференционных полос. Эта задача решается центральным процессором микроЭВМ по разработанному нами алгоритму.

**Алгоритм реверсивного отсчета целых и дробных долей интерференционных полос.** Профиль исследуемой поверхности может иметь три различных типа изменения наклона: уменьшение высоты рельефа, увеличение и отсутствие наклона (рис. 3).

Назначение алгоритма состоит в том, чтобы по изменению сдвига интерференционных полос восстановить профиль поверхности, представленный на рис. 3, а—в. Необходимо также обеспечить возможность накопления сигнала в одной точке в условиях вибраций и акустических шумов, причем за время усреднения в результате воздействия этих факторов сдвиг полос может происходить на величину  $n\lambda/2$ , где  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Рассмотрим реверсивный счет интерференционных полос в этих условиях. Пусть  $a(i, k)$ :

$$\begin{aligned} &a(1, 1), a(1, 2), \dots, a(1, M); \\ &a(2, 1), a(2, 2), \dots, a(2, M); \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ &a(N, 1), a(N, 2), \dots, a(N, M) \end{aligned} \quad (1)$$

— данные о дробной части интерференционной полосы. Текущие индексы  $i, k$  изменяются в пределах  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $k = 1, 2, \dots, M$  и означают номер точки профиля поверхности и количество усреднений соответственно. Средний сдвиг  $\bar{X}$  интерференционной полосы в произвольной точке  $i$  можно представить в виде

$$\bar{X}(i) = \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{l=0}^M P(j, l) + \frac{\sum_{k=1}^M \left( a(i, k) + \sum_{l=0}^k P(i, l) \right)}{M}, \quad (2)$$

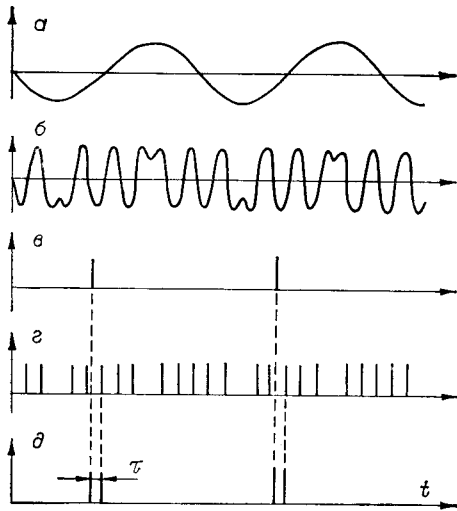


Рис. 2. Временная диаграмма работы бесконтактного интерференционного профилографа:

*a* — изменение разности хода интерферометра; *b* — электрический сигнал на выходе фотоприемника; *c* — электрический импульс, формируемый в начале линейного участка синусоидального сигнала; *d* — электрический импульс, формируемый в момент пересечения нуля сигналом *b*;  $\tau$  — интервал времени, пропорциональный сдвигу интерференционных полос, начало которого совпадает с началом линейного участка синусоиды, а конец — с нулем интерференционного сигнала. (Для простоты количество максимумов полос сигнала *b* уменьшено)

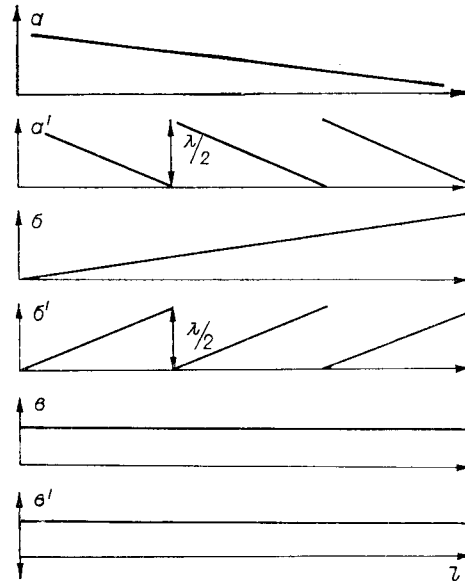


Рис. 3. Три возможных случая изменения профиля поверхности и соответствующие им данные о сдвиге интерференционных полос:

*a* — уменьшение высоты рельефа поверхности; *b* — увеличение; *c* — отсутствие изменения; *a'* — *b'* — соответствующее изменение сдвига интерференционных полос

где  $P(i, l)$  принимает значения  $-a_{\max}$ ,  $+a_{\max}$  либо 0. Для каждой  $(i, k)$ -й точки  $P(i, l)$  определяется из условия

$$|a(i, k+1) - a(i, k)| < C. \quad (3)$$

Если условие (3) выполняется, то  $P(i, l) = 0$ , если не выполняется, то анализируется знак разности (3): когда разность положительная, то  $P(i, l) = -a_{\max}$ , когда отрицательная, то  $P(i, l) = a_{\max}$ . Значение  $C$  выбирается из условия

$$|\Delta a| < C < a_{\max}, \quad (4)$$

здесь  $\Delta a$  — максимальный сдвиг интерференционной полосы для двух ближайших отсчетов;  $a_{\max}$  соответствует сдвигу полосы на величину  $\lambda/2$ .

Таким образом, данные, обработанные по формуле (2), с учетом условия (3) позволяют реверсивно отсчитывать целые и дробные доли интерференционных полос в каждой из точек измерения профиля поверхности.

**Клиновидность воздушного зазора между образцом и эталоном.** Между образцом и эталоном имеется клиновидный воздушный промежуток. Угол клина составляет величину 1—10 с, что практически не вызывает искажений изображения исследуемого образца. Поскольку система фактически измеряет изменение воздушного зазора между образцом и эталоном, то микроскопические вариации профиля поверхности исследуемого образца очень слабо проявляются на фоне клиновидности. Пример такой профилограммы приведен на рис. 4. Из рисунка видно, что профиль поверхности представляет собой сумму линейной функции и собственной микрогеометрии образца. Методом наименьших квадратов [7] можно определить параметры  $b_1$  и  $b_0$  линейной функции, искажающей профиль поверхности образца

$$y = b_1 x + b_0. \quad (5)$$

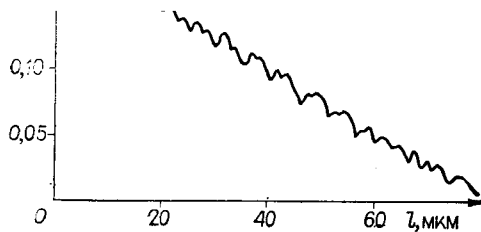


Рис. 4. Периодический профиль поверхности кристалла кварца, искаженный клиновидностью воздушного зазора между образцом и эталоном

Вычитание функции (5) из исходного профиля позволяет устранить искажения, связанные с клиновидностью воздушного зазора. Пример такой процедуры над профилограммой показан на рис. 5.

Таким образом, применение описанной выше математической обработки позволяет устранить искажения профиля поверхности, связанные с клиновидностью воздушного зазора, и ослабить требования к точности юстировки интерферометра.

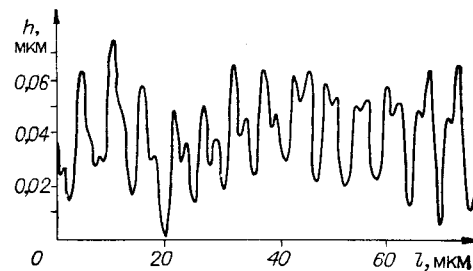
**Контрольные результаты.** Точность интерференционных измерений профиля поверхности ограничивается стабильностью исходной меры — длины волны лазера. Ее значение для промышленных одночастотных лазеров известно с относительной ошибкой  $5 \cdot 10^{-9}$ . Однако на практические измерения профиля поверхности оказывают влияние и другие факторы: белый шум электронной системы регистрации, вибрация, температурный дрейф.

С целью выявления источников погрешностей измерения высоты неровностей поверхности были исследованы собственные шумы электронной системы регистрации без оптического сигнала на входе фотоприемника. Измерения показали (рис. 6, а), что собственный шум электронной системы без накопления и цифровой фильтрации соответствует амплитуде 0,4 нм.

Подключение оптического сигнала без сканирования изображения поверхности образца приводит к резкому повышению шумового сдвига интерференционных полос (рис. 6, б) до величины 1 нм; более низкая частота таких шумов указывает на то, что они, по-видимому, обусловлены акустическими и механическими колебаниями базы интерферометра.

Ошибки, связанные с температурным дрейфом, складываются из ошибок от температурных дрейфов измерительного тракта и базы интерферометра. Наблюдения в течение 8 ч показали, что наиболее существенна ошибка, вызванная дрейфом измерительного тракта,  $\sim 0,05$  мкм за 8 ч; однако благодаря автоматической калибровке измерительного канала перед каждой записью профилограммы эта ошибка компенсируется программным путем. Температурный дрейф базы интерферометра за 8 ч достигал величины 0,0005 мкм при изменении температуры в помещении на величину  $\pm 2^\circ$ . Время записи одной профилограммы длиной

Рис. 5. Профиль поверхности кристалла кварца после программного вычитания линейной функции, связанной с клиновидностью зазора между образцом и эталоном



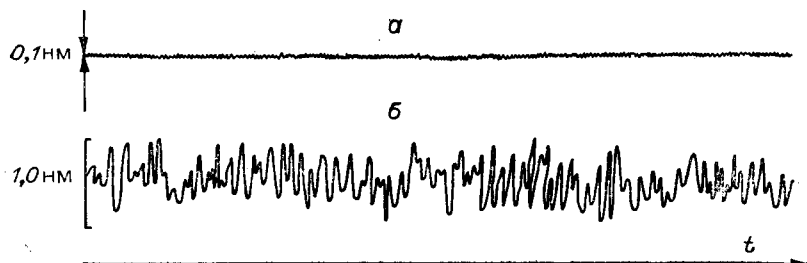


Рис. 6. Шумы электронной системы регистрации без оптического (а) и с оптическим (б) сигналами, полученные без накопления и цифровой фильтрации измерений

80 мкм составляло величину от 1 до 3 мин (в зависимости от количества усреднения сдвига интерференционных полос в одной точке). Таким образом, ошибка, связанная с температурным дрейфом базы интерферометра, составила величину 0,01—0,1 нм.

Пространственная разрешающая способность интерференционного профилографа исследовалась с помощью эталонных образцов. Методом ионного травления через маску на полированной поверхности стекла формировался прямоугольный периодический профиль и одиночная ступенька; образец исследовался на растровом электронном микроскопе РЭМ-100У. Установлено, что форма ступенек близка к прямоугольной, а период составляет 1,6 мкм. Профиль поверхности того же образца записывался на лазерном интерференционном профилографе (рис. 7). Отклонение формы профиля от прямоугольной связано с ограниченной разрешающей способностью профилографа, а некоторое различие высоты ступенек — с шероховатостью подложки, которая отчетливо проявляется на верхней плоскости одиночной ступеньки (см. рис. 7, б).

Точность интерференционных измерений профиля поверхности прямо зависит от точности изготовления эталонной поверхности интерферометра. С использованием в качестве контролируемого образца и эталона нижней пластины для интерференционных измерений определена суммарная ошибка изготовления эталонов в пределах базовой длины (рис. 8). Для разных участков поверхности эта ошибка составила величину 0,5—1 нм. Чтобы уменьшить влияние других погрешностей, в каждой точке профилограммы производилось накопление данных и цифровая фильтрация аномальных результатов измерений по алгоритму [8].

Для того чтобы убедиться в повторяемости результатов, дважды осуществляли запись профиля поверхности полированного кристалла кварца (рис. 9). Видно, что разница между профилограммами не превосходит 0,5 нм.

Таким образом, описанный выше бесконтактный интерференционный профилограф имеет пространственную разрешающую способность 1,6—2 мкм и точность измерения высоты неровностей  $\pm 0,5$  нм. Характери-

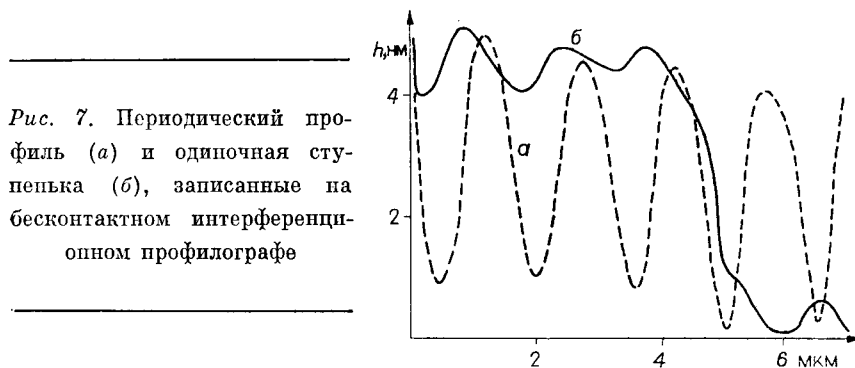


Рис. 7. Периодический профиль (а) и одиночная ступенька (б), записанные на бесконтактном интерференционном профилографе

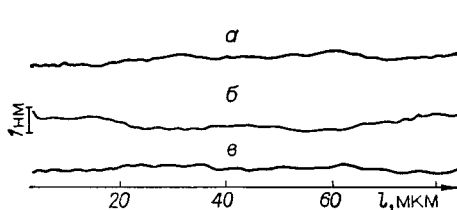


Рис. 8. Суммарная ошибка изготовления двух эталонных поверхностей, измеренная в разных местах (а — в)

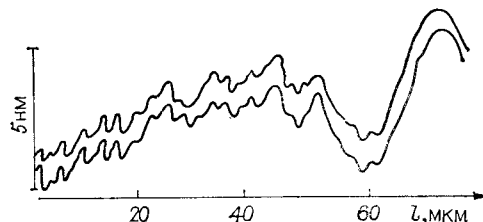


Рис. 9. Профиль поверхности кристалла кварца, полученный путем двукратного сканирования по одному и тому же месту

стики профилограмм, полученные с помощью описанного выше профилографа, хорошо согласуются с соответствующими результатами [9], полученными на контактом профилографе модели 201.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Застрогин Ю. Ф. Контроль параметров движения с использованием лазеров.— М.: Машиностроение, 1981.
2. Hung C—C. Optical heterodyne profilometer // Opt. Eng.—1984.— V. 23, N 4.— P. 365.
3. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.— Введ. 1973.
4. А. с. 1285320 (СССР). Устройство для измерения сдвига интерференционных полос/Н. П. Шестаков, А. П. Шешуков, В. А. Фроленко.— Опубл. в БИ, 1987, № 3.
5. Андрущак Е. А., Тычинский В. П. Цифровая фазометрическая система счета целой и дробной доли полосы для гомодинного интерферометра // ПТЭ.— 1980.— № 2.
6. Ребрин Ю. К. Управление оптическим лучом в пространстве.— М.: Сов. радио, 1977.
7. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений.— Изд. 2.— М.: Физматгиз, 1962.
8. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов.— М.: Мир, 1982.
9. Шестаков Н. П., Шешуков А. П., Фроленко В. А., Гоняев В. С. Интерференционный профилограф.— Красноярск, 1986. (Препринт/АН СССР, Физ. ин-т, № 367Ф).

Поступила в редакцию 25 апреля 1986 г.

УДК 535.417.2

М. И. ЗАХАРОВ

(Новосибирск)

#### АППАРАТНЫЕ ФУНКЦИИ И СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА МНОГОЛУЧЕВЫХ ОТРАЖАЮЩИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ С АНИЗОТРОПНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

1. В последние годы значительно возрос интерес к двухзеркальным многолучевым интерферометрам, работающим в отраженном свете [1]. Отражающий интерферометр с поглощающим передним зеркалом, как показали теоретические и экспериментальные исследования [2], не только не уступает по своим параметрам интерферометру Фабри — Перо для проходящего света, но и превосходит его по контрасту интерференционной картины и по возможности получения требуемой асимметрии полос. К сожалению, область применения такого интерферометра ограничена требованиями к уровню допустимой мощности падающего излучения и к толщине поглощающего слоя по сравнению с длиной волны. Один из путей преодоления указанных недостатков — замена поглощающего зеркала дифракционным [1, 3].

Не менее перспективны, на наш взгляд, поляризационные методы, для которых характерно применение поляризатора, установленного перед