

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

621.317.767

ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ*В. И. Шмальгаузен*

Бесконтактные оптические методы исследования колебаний твердых тел открывают новые возможности в целом ряде экспериментов. Остерберг¹ заменил одно из зеркал в интерферометре Майкельсона посеребренной пьезокварцевой пластинкой и наблюдал изменение контрастности интерференционной картины при гармонических колебаниях пластинки. Таким образом удалось измерить амплитуду колебаний, не превышающую длины световой волны. Более чувствительный метод состоит в регистрации мгновенных смещений интерференционной картины, вызванных колебаниями зеркала, с помощью малоинерционного фотодатчика. Возникающий электрический сигнал может быть усилен и выделен на фоне помех с помощью узкополосного фильтра. Так могут быть зарегистрированы колебания с амплитудой существенно меньше минимально обнаружимых статических смещений зеркала интерферометра. Возможность накопления сигнала за время $T \sim \Delta f^{-1}$, где Δf — полоса пропускания фильтра, обеспечивает более высокую чувствительность, чем развитые в последнее время методы голографической интерферометрии.

Предельная чувствительность метода была исследована Берштейном² и Гореликом³. Считалось, что сигнал, вызванный колебаниями зеркала, может быть обнаружен, если его мощность превышает мощность шума в полосе пропускания применяемого узкополосного фильтра. Источником флуктуаций является дробовой шум фотоприемника, связанный с дискретностью электрического заряда. Таким образом можно получить оценку для минимально обнаружимой амплитуды колебаний:

$$a_m = 0,16\lambda \sqrt{\frac{\beta e \Delta f}{i}}, \quad (1)$$

здесь λ — длина волны использованного света, e — заряд электрона, i — средняя величина тока фотокатода, β — коэффициент, учитывающий превышение шума реального фотоприемника над пуассоновским шумом, создаваемым потоком квантов света. (Для идеального приемника $\beta = 1$, для фотомножителей $\beta = 2-3$.) Справедливость оценки (1) проверялась экспериментально. С нелазерным источником света удалось зарегистрировать колебания с амплитудой $3 \cdot 10^{-11}$ см при полосе анализа $\Delta f = 1$ Гц.

Появление источников достаточно мощного когерентного излучения сильно расширило область применения оптических методов регистрации малых колебаний. Появилась возможность исследования образцов с незеркальной поверхностью, так как рассеянного ими света оказывается достаточно для регистрации интерференционной картины.

Лазерные виброметры различных конструкций^{4,5} успешно применялись в исследованиях по акустике твердого тела. При изучении упругих

поверхностных волн в кристаллах и изотропных телах эффективно используются дифференциальные интерферометры⁶, регистрирующие разность смещений двух точек образца. Тем не менее надежды на значительное повышение чувствительности интерферометров оправдались лишь отчасти. Так, приведенный выше результат был улучшен на два порядка, хотя оценки по дробовому шуму позволяли рассчитывать при существующей мощности лазеров на получение большей предельной чувствительности (10^{-14} см при мощности источника 0,5 Вт). Причина состоит в том, что при увеличении мощности источника доминирующими становятся шумы другой природы — флуктуации лазерного излучения и микросейсмические колебания установки.

Для компенсации паразитных вибраций рядом авторов⁷⁻⁹ применялась электромеханическая следящая система, смещающая опорное зеркало интерферометра. Зеркало закреплялось на пьезоэлементе, который управлялся сигналом с выхода специального сервоусилителя. Система конструировалась таким образом, что медленные по сравнению с исследуемым сигналом деформации установки компенсировались смещением опорного зеркала и не вызывали изменения интерференционной картины. Возможности систем такого типа ограничены малой величиной достижимых перемещений зеркала. Увеличение размеров или применение секционированных пьезоэлементов снижает собственную частоту преобразователя и ограничивает возможность компенсации быстрых возмущений. Для преодоления этого противоречия предлагается¹⁰ использовать секционированный пьезоэлемент, состоящий из набора дисков, выводы которых изолированы друг от друга. Различные части составного пьезоэлемента подключаются к сервоусилителю через специально подобранные корректирующие фильтры. Эта мера позволяет значительно улучшить фазо-частотную характеристику системы пьезоэлемент-зеркало и повысить примерно на порядок устойчивое усиление в контуре обратной связи.

Таким методом удавалось компенсировать вызванные микросейсмами колебания установки с амплитудами ~ 1 мкм в полосе частот свыше 1000 Гц. Другим направлением в борьбе с механическими помехами является использование дифференциальных интерферометров⁶, измеряющих разность смещений между двумя точками исследуемого объекта. При этом исключаются помехи, вызванные поступательным перемещением объекта. Требования к системе, компенсирующей низкочастотные возмущения, в дифференциальных интерферометрах существенно ниже, чем в обычных. В случаях, не требующих особенно высокой чувствительности, следящую систему можно вообще не использовать.

Для уменьшения помех, создаваемых флуктуациями амплитуды лазерного излучения, используют метод вычитания шумов, для чего в работе⁷ использовался специальный фотоприемник. В работе⁹ с той же целью использована дополнительная интерференционная картина. Эти меры особенно полезны в установках, где применены сравнительно мощные нестабилизированные лазеры, обладающие большим уровнем технических флуктуаций. Флуктуации частоты света приводят к появлению дополнительной оптической разности хода и эквивалентны смещению объекта на величину

$$\Delta x = \Delta l \frac{\Delta \lambda}{\lambda}, \quad (2)$$

где Δl — разность длин плеч интерферометра. Достаточно медленный дрейф частоты не играет существенной роли, так как возникающая разность хода устраняется следящей системой путем смещения опорного зеркала. В разноплечных интерферометрах ($\Delta l \neq 0$) эта помеха вообще

отсутствует. В дифференциальных интерферометрах разность длин плеч обычно весьма мала.

Перечисленные методы снижения уровня технических шумов удачно комбинируются в дифференциальном поляризационном интерферометре¹¹, применявшемся для измерения малых динамических деформаций твердых тел.

Схема установки приведена на рис. 1, а. Световой пучок от гелий-неонового лазера проходит длиннофокусную линзу 1, фокусирующую

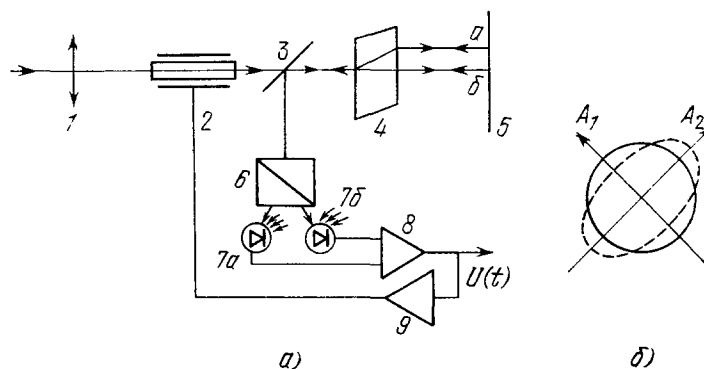


Рис. 1. а) Схема дифференциального поляризационного интерферометра; б) характер поляризации света на входе анализатора.

свет на поверхности объекта 5, и попадает в электрооптический модулятор 2. Модулятор, содержащий кристалл КДР, ориентированный под углом 45° к плоскости поляризации падающего света, вносит контролируруемую разность фаз между возникающими в нем обыкновенным и необыкновенным лучами. Пройдя делительную пластинку 3, пучок света попадает на пластинку кальцита 4, где обыкновенный и необыкновенный лучи разводятся в пространстве и фокусируются соответственно в точках а и б объекта. Расстояние между точками а и б может изменяться путем поворота пластинки 4. Такой метод разделения пучков в интерферометре с плавным изменением их разнесения был успешно применен¹² для высокоточных измерений степени пространственной когерентности лазерного излучения. Рассеянный объектом свет, пройдя в обратном направлении через кристалл кальцита и отразившись от делительной пластинки 3, попадает на анализатор 6. Начальная разность фаз между лучами с ортогональной поляризацией выбирается с помощью модулятора 2 такой, чтобы свет, падающий на анализатор 6, был поляризован по кругу (рис. 1, б). При деформации объекта 5 разность хода между лучами изменяется, и круг превращается в эллипс (показано штриховой линией на рис. 1, б). Главные плоскости анализатора, разводящего свет на два одинаковых фотоприемника 7а и 7б, ориентированы по осям эллипса. Таким образом, деформация или наклон объекта приводят к разбалансу фототоков, поступающих на входы дифференциального усилителя 8. Сигнал $U(t)$ с выхода усилителя 8 поступает на систему регистрации, а также на вход сервоусилителя следящей системы 9. Постоянная времени этой цепи может изменяться в зависимости от потребностей эксперимента. Выходной сигнал усилителя 9 подается на электрооптический модулятор таким образом, что компенсирует смещение объекта, восстанавливая круговую поляризацию света на входе анализатора 6. При быстрых колебаниях поверхности исследуемого тела цепь обратной связи не успевает скомпенсировать

возмущение, и соответствующий сигнал появляется на выходе установки. В качестве источника света использовался лазер ЛГ-38. Ток разряда трубки был уменьшен для ослабления амплитудных флуктуаций. При работе с зеркально отражающим объектом световой поток лазера ослаблялся нейтральными фильтрами во избежание перегрузки фотоприемников. При использовании рассеивающих объектов световой поток может быть использован полностью.

В интерферометре достигается высокая степень компенсации амплитудных флуктуаций благодаря полной симметрии каналов. Уменьшение флуктуации на выходе дифференциального усилителя по сравнению с одним каналом достигает двух порядков. Тем не менее флуктуации амплитуды оставались лимитирующим фактором при исследовании колебаний с частотами ниже 200 кГц.

С помощью описанного устройства удавалось надежно обнаруживать колебания пьезоэлектрической пластинки с зеркальной поверхностью с амплитудой 10^{-11} см на частоте 170 кГц при полосе анализа $\Delta f = 300$ Гц. Приведение этой величины к стандартной полосе анализа

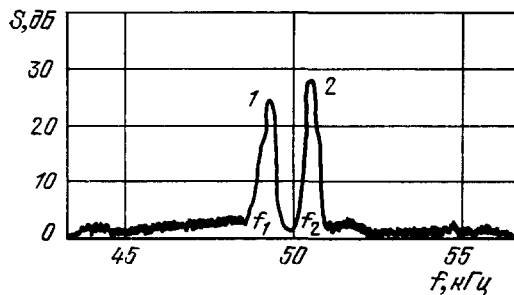


Рис. 2. Спектрограмма колебаний пластинки, наблюдаемой через слой жидкости. 1 — спектр исследуемого колебания; 2 — контрольный сигнал.

1 Гц дает оценку минимально обнаружимой амплитуды $a_m = 6 \cdot 10^{-13}$ см. Такой пересчет, однако, дает лишь грубую оценку из-за неравномерности спектра помех. Работа поляризационного интерферометра в условиях сильных внешних помех иллюстрируется рис. 2, где приведена спектрограмма колебаний легкого зеркала, погруженного в жидкость. Колебания зеркала на частоте f_1 вызывались распространяющейся в жидкости акустической волной. Наблюдение велось через свободную поверхность жидкости. Зеркало располагалось на глубине 10 см. Пик на частоте f_2 представляет собой контрольный сигнал, создаваемый модулятором. Его величина эквивалентна колебаниям с амплитудой $5 \cdot 10^{-7}$ см и превышает уровень шумов установки более чем на порядок. Основным источником помех при такой постановке эксперимента является нерегулярное движение свободной поверхности жидкости, вызывающее модуляцию разности хода интерферирующих лучей. В обычных лабораторных условиях случайная вариация оптической разности хода значительно превышает длину волны света и делает невозможными интерферометрические измерения по обычной схеме. Применение дифференциального интерферометра позволяет, как видно из рис. 2, регистрировать в таких условиях колебания с малыми по сравнению с λ амплитудами. Естественно, что чувствительность установки в таком эксперименте оказывается значительно меньше предельной.

В заключение обсудим еще одну возможность снижения уровня помех. Во всех упомянутых интерферометрах начальная разность плеч (рабочая точка) выбиралась таким образом, чтобы обеспечить наибольшую чувствительность. Это соответствует сдвигу фаз $\pi/2$ между опорным и предметным лучами. Изменение начальной разности хода уменьшает чувствительность установки, однако отношение сигнала к шуму может иногда быть улучшено. Как замечено¹³, смещение рабочей точки в область

меньших интенсивностей (т. е. в сторону темной полосы) улучшает отношение сигнала к пуассоновскому шуму. Аналогичный вывод справедлив также по отношению к помехам, вызываемым флуктуациями мощности лазера. Наиболее перспективно применение метода смещенной рабочей точки в интерферометрах, имеющих симметричную оптическую схему и дифференциальное включение фотодатчиков. В поляризационном интерферометре такая схема измерений может быть реализована путем изменения конструкции анализатора.

Поляризационный интерферометр использовался для изучения малых деформаций твердых тел и колебаний поверхности жидкостей, вызываемых акустическими волнами. Поскольку такой прибор регистрирует разность

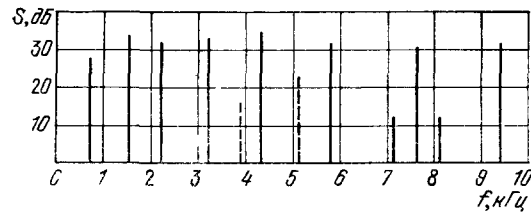


Рис. 3. Спектр собственных частот стальной пластинки, полученной с помощью поляризационного интерферометра.

смещений двух близких точек поверхности, то фактически он является чувствительным датчиком локального наклона. По распределению наклонов можно восстановить профиль деформированной поверхности. Интерферометр позволяет регистрировать колебания исследуемого тела в условиях, когда применение обычных датчиков затруднено, например при высоких температурах или при охлаждении образца в дьюаре. Особенно удобен интерферометр для исследования спектров собственных колебаний. С этой целью колебания образца возбуждаются в широкой области частот с помощью преобразователя, на который подается сигнал с генератора шума. Выходной сигнал интерферометра подается на анализатор спектра электрических сигналов. Таким образом регистрируется сразу весь спектр собственных частот, и любые его изменения хорошо заметны. На рис. 3 приведен спектр частот стальной пластинки¹¹. Сплошными линиями показаны основные изгибные моды, штриховыми — другие виды колебаний.

Современные лазерные интерферометры для регистрации малых колебаний являются высокочувствительными приборами и с успехом используются в экспериментах по изучению малых колебаний упругих тел.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Osterberg H.— JOSA, 1932, v. 2, p. 19.
2. Берштейн И. Л.— ДАН СССР, 1954, т. 94, с. 655.
3. Горелик Г. С.— Изм. техника, 1955, № 3, с. 11.
4. Sizgolic S.— Proc. IEEE, 1969, v. 57, p. 1313.
5. Захаров В. П., Евтихнев Н. Н., Снежко Ю. А., Тычинский В. П.— Акуст. ж., 1976, т. 22, с. 32.
6. Palmer S., Claus R., Fisk S.— Appl. Opt., 1977, v. 16, p. 1849.
7. Бондаренко А. Н., Маслов Б. Я., Рудая Б. Б., Троценко В. П.— ПТЭ, 1975, № 6, с. 241.
8. Базыленко В. А., Прокопенко В. Е., Старков Г. С.— ПТЭ, 1970, № 6, с. 181.

9. Демиденко Т. Ф., Шенявский Л. А., Шмальгаузен В. И.— Квант. электроника, 1977, т. 4, с. 2448.
10. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И.— Вестн. Моск. ун-та, Сер. «Физика, астрономия», 1977, т. 18, № 2, с. 67.
11. Шенявский Л. А., Шмальгаузен В. И.— Ibid., 1978, т. 19, № 1, с. 125.
12. Аракелян С. М., Арутюнян А. Г., Ахманов С. А., Тункин В. Г., Чиркин А. С.— В кн. Квантовая электроника.— М.: Сов. радио, 1974, № 1, с. 215.
13. Коронкевич В. П., Соболев В. С.— В кн. Лазерные интерферометры.— Новосибирск: Ин-т автоматки и электроники СО АН СССР, 1978.— С. 3.