

УДК 53.082.5; 681.787

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДЫ УПРУГИХ СМЕЩЕНИЙ КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

Я. Л. Вороховский,

канд. техн. наук, генеральный директор

В. В. Молоток,

доктор техн. наук, зам. директора

ОАО «Морион»

В. В. Клудзин,

доктор техн. наук, профессор

Л. Н. Пресленев,

канд. техн. наук, доцент

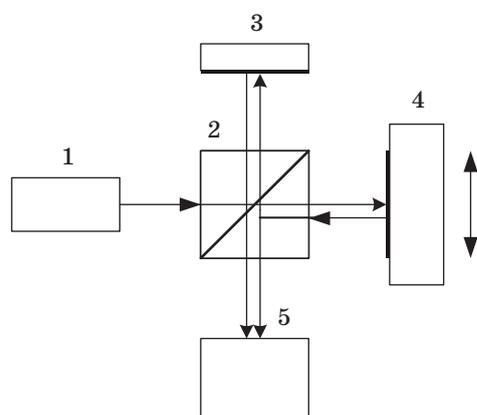
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Анализируются и экспериментально исследуются две схемы оптического интерферометра, предназначенные для измерений пространственных распределений акустических смещений на поверхности кварцевого резонатора. Вводимая в схему интерферометра акустооптическая ячейка служит для смещения частоты оптического сигнала, что позволяет заметно повысить стабильность и надежность процесса измерений и оценивать абсолютное значение амплитуды акустических смещений на поверхности резонатора. Проведен анализ чувствительности интерферометра на основе оценки уровня шумов и оптимального выбора параметров устройства.

Ключевые слова — оптический интерферометр, акустооптическая ячейка, упругие смещения, опорная волна, спектр фазомодулированного сигнала, чувствительность устройства.

Введение

Пространственные распределения амплитуды смещений могут быть измерены оптическим методом на основе использования интерферометра Майкельсона (рис. 1).



■ **Рис. 1.** Схема интерферометра Майкельсона для измерения величины упругого смещения на поверхности кварцевого резонатора

В схеме интерферометра поступающий от источника когерентного оптического излучения (лазера) 1 оптический сигнал на фотоприемнике 5 $\dot{e}(t)$ состоит из двух компонент, одна из которых формируется в вертикальном плече за счет отражения от зеркала 3 и обозначается как опорная волна $\dot{e}_0(t, r)$. Вторая компонента формируется в горизонтальном плече за счет двойного отражения от вибрирующей поверхности кварцевого резонатора 4 и возвращающего зеркала 2 и обозначается как сигнальная волна $\dot{e}_S(t, r)$. Если опорная волна записывается в традиционной форме как

$$e_0(t, r) = E_0 \cos(\omega_0 t - kr + \varphi_1(t)),$$

то волна сигнальная $\dot{e}_S(t, r)$ содержит фазовые изменения вследствие колебаний резонатора:

$$e_S(t, r) = E_S \cos(\omega_0 t + m \cos \Omega t - kr + \varphi_2(t)),$$

где $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ — фазовые набег в разных плечах интерферометра.

При согласовании фазовых фронтов опорной и сигнальной волн реализуется их простран-

ственная когерентность, поэтому пространственными и угловыми координатами в выражении для обеих волн можно пренебречь. Тогда можно считать, что на входе фотоприемника действует сумма двух сигналов $\dot{e}_\phi(t) = \dot{e}_0(t) + \dot{e}_S(t)$, а в отклике приемника на эту сумму следует выделить интермодуляционную составляющую $I_\phi \sim 2\eta\dot{e}_0(t)\dot{e}_S(t)$. Очевидно, что полезная компонента тока фотоприемника $I_\phi(t) = 0,25\eta P_0 \cos(m\cos\Omega t + \varphi(t))$, где η — чувствительность фотоприемника; $\varphi(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1(t)$ — разность фаз; $m = 4\pi U/\lambda_0$ — индекс фазовой модуляции; U — амплитуда смещения на поверхности резонатора; λ_0 — длина оптической волны. Здесь предполагается, что $E_0 \approx E_S = 0,5\sqrt{P_0}$, где P_0 — мощность лазерного потока.

В общем случае спектр выходного сигнала фотоприемника зависит от разности фаз $\varphi(t)$ и при малом индексе модуляции $m \ll 1$ может быть представлен в форме

$$I_\phi = I_0 \{ (1 - 0,25m^2)\cos\varphi - m\cos\Omega t \sin\varphi - 0,25m^2\cos 2\Omega t \cos\varphi \},$$

где $I_0 = 0,25\eta P_0$. Характерно, что максимальное значение амплитуды гармоники Ω реализуется при $\varphi = \pi/2$, а при $\varphi \approx N\pi$ (N — целое число) амплитуда второй гармоники 2Ω уменьшается в $0,25m$ раз сравнительно с первой и появляется значительная по уровню постоянная составляющая. В процессе измерений разность фаз φ может заметно изменяться за счет локальных флуктуаций температуры, влажности, вибраций и пр. Значение разности фаз φ определяется оптическими длинами плеч интерферометра n_1L_1, n_2L_2 :

$$\varphi(t) = 2\pi(n_1L_1 - n_2L_2)/\lambda_0.$$

Кроме того, на разность фаз φ оказывают влияние пространственные и угловые рассогласования между опорным и сигнальным лучами [1].

Требования, предъявляемые к усилительной части устройства, заключаются в оптимальном выборе полосы пропускания Δf фотоприемного тракта и минимизации коэффициента шума предварительного усилителя N .

Минимальный уровень амплитуды смещения (чувствительность) U_m , который может фиксировать устройство, определяется уровнем собственных шумов, среди которых наиболее важными являются тепловые и дробовые компоненты шума. Мощность теплового шума P_T с учетом влияния предварительного усилителя может быть оценена как $P_T = 4NkT\Delta f$, где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. Если положить $N = 10$, $T = 290$ К, $\Delta f = 50$ Гц, то $P_T = 8 \cdot 10^{-18}$ Вт, в то время как мощность дробово-

го шума $P_{др} = 2eI_0\Delta fR$, где e — заряд электрона; I_0 — полный ток фотоприемника, зависящий от мощности оптического сигнала на его входе. При условии, что $P_0 = 0,1$ мВт, $\eta = 0,2$ А/Вт, $R = 10^3$ Ом, $P_{др} = 6,4 \cdot 10^{-19}$ Вт, полная мощность шума составит $P_{ш} = 8,6 \cdot 10^{-18}$ Вт.

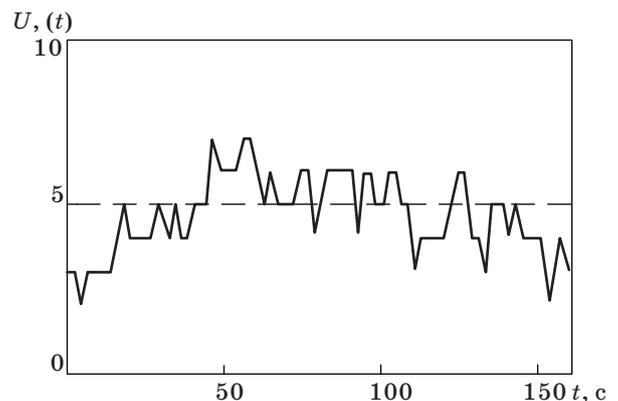
В этих условиях мощность сигнала P_c на выходе фотоприемника может быть определена как $P_c = 0,5 \cdot I_\phi^2 R = 0,5m^2\eta^2 P_0^2 R$. Если предположить, что сигнал должен превышать уровень полной мощности шума в 10 раз, то может быть найдена минимальная величина смещения U_m на поверхности резонатора, уверенно регистрируемая устройством. При выбранных значениях чувствительность интерферометра составляет $U_m = 10^{-12}$ м = $0,01$ Å, что соответствует акустической мощности в резонаторе $\sim 2,2$ мкВт.

В процессе исследования основной проблемой оказалась высокая нестабильность амплитуды отклика на экране анализатора спектра по нескольким причинам, которые зависят от параметров генератора и элементов схемы интерферометра (механических подвижек и лазера). Однако главным источником нестабильности следует считать флуктуации разности фаз $\varphi(t)$.

Подтверждением сказанного являются измерения, проведенные в стационарном состоянии механических подвижек, которые показали значительную нестабильность уровня выходного сигнала. Эюра колебаний уровня отклика на экране анализатора спектра в течение $\approx 2,5$ мин с шагом 2 с представлена на рис. 2.

В некоторые моменты времени выходной сигнал на резонансной частоте Ω резонатора полностью исчезал и при этом заметно возрастал уровень шума, по-видимому, за счет значительного увеличения дробовой компоненты.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность использовать методы оптической интерферометрии для измерений относительных распределений амплитуды смеще-



■ Рис. 2. Временные флуктуации выходного сигнала интерферометра

ний резонатора. Оптический интерферометр позволяет реализовать наивысшую чувствительность при оптимальном выборе параметров устройства, но в то же время эта схема интерферометра обладает существенной нестабильностью в уровнях выходного сигнала, особенно если процесс измерения сопровождается механическими перемещениями элементов схемы.

Интерферометр с акустооптической ячейкой

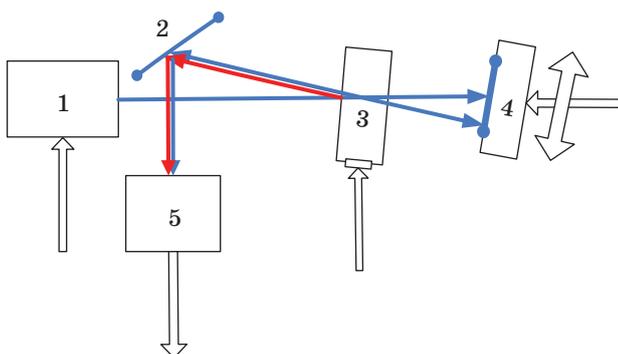
Традиционная схема интерферометра Майкельсона обладает рядом недостатков, причем наиболее важными являются существенная нестабильность уровня выходного сигнала при флуктуации разности фаз между оптическими сигналами и невозможность точного измерения индекса модуляции m .

Эти недостатки устраняются смещением частоты одного из взаимодействующих оптических пучков, например с помощью акустооптического модулятора (АОМ) [2]. При этом в плоскости фотоприемника формируется динамическое распределение поля, а спектр электрического сигнала на выходе фотоприемника формируется на частоте управляющего сигнала АОМ.

При включении следом за фотоприемником радиочастотного анализатора спектра можно быстро и точно определить индекс фазовой модуляции m . При этом на экране анализатора получается спектрограмма, характерная для ФМ-сигнала с малым индексом модуляции. При измерении отношения уровней центральной спектральной компоненты и одной из боковых вычисляется индекс фазовой модуляции в соответствии с соотношением

$$m = 2U_{\text{бок}} / U_{\text{центр}} = 4\pi U / \lambda_0.$$

Интерферометр с АОМ может быть построен по различным схемам. Один из вариантов использует в качестве опорного оптический пучок, отраженный от одной из граней АОМ (рис. 3). В этом



■ Рис. 3. Схема интерферометра с АОМ

случае АОМ используется только как устройство смещения частоты оптического излучения.

Управляющий сигнал с генератора поступает на АОМ 3, преобразуется в акустический сигнал, распространяющийся вдоль модулятора. Луч лазера 1, падая на АОМ, частично отражается от передней грани, тем самым образуя опорный пучок $e_0(t)$, и затем дифрагирует в среде АОМ. Отражаясь от резонатора 4, дифракционный луч $e_S(t)$ попадает на зеркало 2 и коллинеарно с отраженным пучком поступает на фотоприемник 5. Выходной сигнал фотоприемника поступает на вход радиочастотного анализатора спектра.

В этом случае опорный сигнал $e_0(t)$ формируется при отражении лазерного луча от передней грани АОМ в форме

$$e_0(t) = E_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_1(t)),$$

где $E_0 = g\sqrt{P_0}$, g — амплитудный коэффициент отражения оптической волны от передней грани АОМ ($g = 0,17$).

Сигнальная компонента $e_S(t)$ образована дифрагированным лучом, который отражается от колеблющейся поверхности резонатора и поэтому приобретает форму

$$e_S(t) = E_S \cos((\omega_0 - \omega_a)t + m \cos \Omega t + \varphi_2(t)),$$

где $E_S = \sqrt{\gamma P_0}$, γ — коэффициент, характеризующий эффективность акустооптического взаимодействия в АОМ ($\sqrt{\gamma} = 0,4 - 0,8$ в зависимости от уровня управляющего сигнала АОМ); ω_a — частота акустического сигнала, определяющая доплеровский сдвиг частоты оптического сигнала при дифракции на движущейся решетке, созданной акустической волной в среде АОМ.

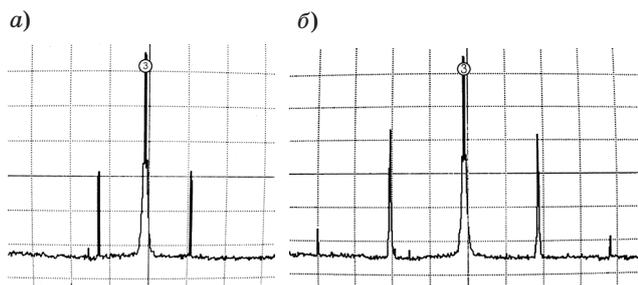
Для этой схемы комбинационная компонента тока фотоприемника представляет собой классический фазомодулированный сигнал

$$I_\varphi = I_0 \{ \cos(\omega_a t + \varphi) - 0,5m \sin((\omega_a + \Omega)t + \varphi) - 0,5m \sin((\omega_a - \Omega)t + \varphi) \},$$

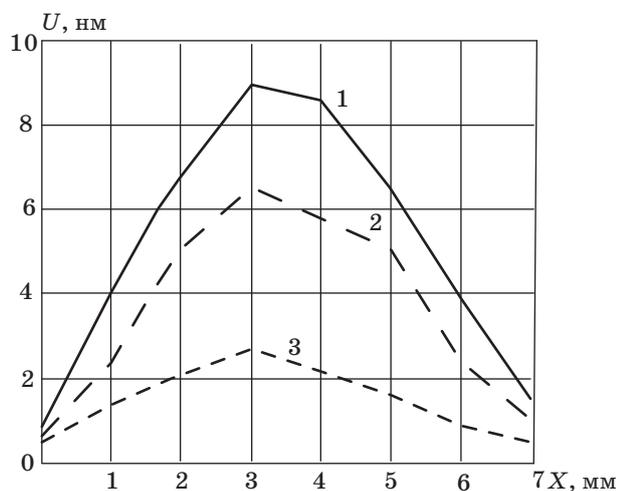
где $I_0 = \eta E_0 E_S = \eta g P_0 \sqrt{\gamma}$.

Амплитудный спектр этого сигнала практически не зависит от флуктуирующей разности фаз φ и позволяет достаточно точно измерять индекс фазовой модуляции m и амплитуду акустического смещения резонатора U .

Экспериментально наблюдаемые спектры для третьей (3062,68 кГц) и пятой (5075,45 кГц) гармоник кварцевого резонатора показаны на рис. 4. Масштаб по оси ординат — логарифмический, одна клетка — 10 дБ. Центральная частота спектра определяется частотой управляющего сигнала АОМ и составляет ~30 МГц. При значительном



■ **Рис. 4.** Спектры выходных сигналов интерферометра при возбуждении: а — третьей гармоники резонатора напряжением 0,4 В, $m = 0,044$, $U = 23 \text{ \AA}$; б — пятой гармоники резонатора напряжением 1 В, $m = 0,11$, $U = 58 \text{ \AA}$



■ **Рис. 5.** Пространственные распределения амплитуды смещений: 1 — вдоль диаметра резонатора; 2 — на 1 мм ниже центральной оси резонатора; 3 — на 2 мм ниже центральной оси резонатора

увеличении уровня центральной компоненты (более -10 дБм на входе анализатора спектра) проявляются нелинейные эффекты элементов приемного тракта.

При индексе модуляции $m = 0,11$ (см. рис. 4, б) наряду с основной парой боковых гармоник появляются высшие спектральные компоненты, уро-

вень которых определяется значением функции Бесселя второго порядка. Экспериментально измеренный минимальный уровень амплитуды упругого смещения составлял $0,2 \text{ \AA}$ при амплитуде сигнала на резонаторе ~ 4 мВ. Пространственные нормированные распределения амплитуды смещений поверхности кварцевого резонатора представлены на рис. 5.

Можно избавиться от механических перемещений резонатора, введя электронное сканирование оптического луча, если АОМ придать функции дефлектора. Однако в этом случае значительно уменьшается степень использования энергии оптического луча, снижается чувствительность устройства и возрастают вероятности возникновения погрешностей рассогласования при юстировке устройства.

Заключение

Схема интерферометра с использованием АОМ позволяет эффективно и точно измерять амплитуду упругого смещения и фиксировать пространственные распределения величины смещения по поверхности резонатора. Минимальный уровень экспериментально измеренной амплитуды смещения составлял $0,2 \text{ \AA}$, в то время как теоретический предел — $0,01 \text{ \AA}$. В процессе измерений распределений возможны рассогласования фазовых фронтов сигнального и опорного лучей, что связано с угловой нестабильностью устройств механического перемещения резонатора.

Литература

1. Tynes A. R., Bisbee D. L. Precise interferometry of glass plates // IEEE J. Quantum Electronics. Nov. 1967. Vol. QE-3. P. 459–463.
2. Whitman R. L., Laub L. J., Bates W. J. Acoustic surface displacement on a wedge-shaped transducer using an optical probe technique // IEEE transactions. 1968. Vol. SU-15. N 3. P. 186–189.