

УДК 534.615

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЕ ГОЛОГРАММЫ  
КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВ

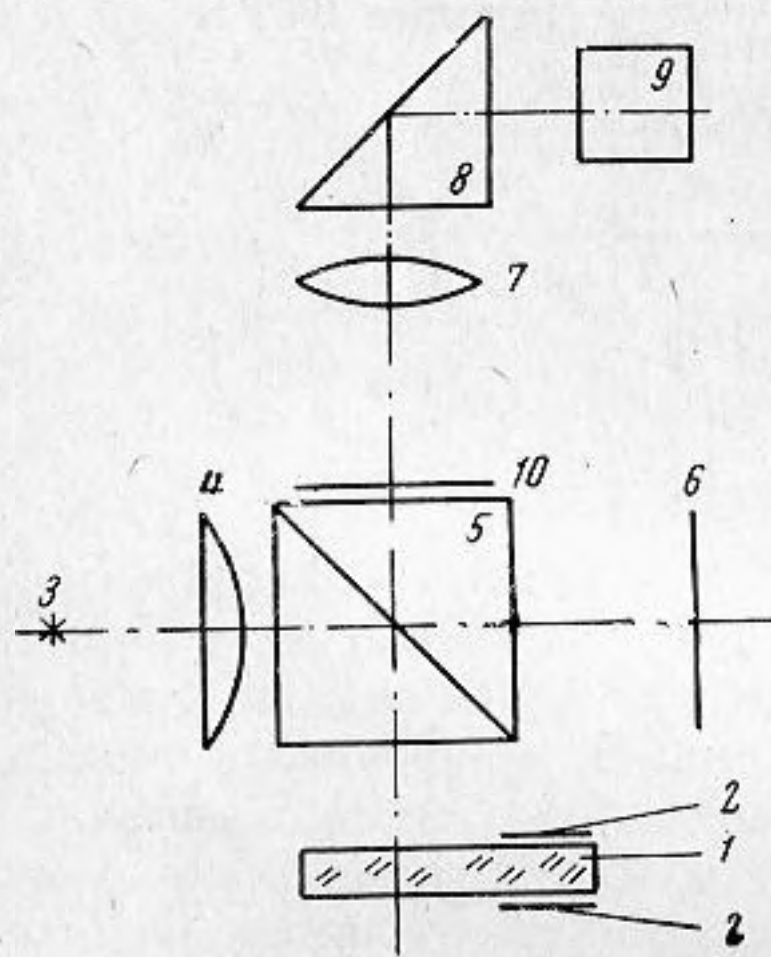
М. А. Зонхив

Описан метод получения интерферометрических голограмм с численным определением значений амплитуд и фаз колебаний отдельных точек вибрирующего тела. Метод применен для определения этих параметров у пьезокварцевой пластины АС-среза на частотах продольного, контурного и сдвигового типов колебаний.

При исследовании колебательных образов пьезокварцевых пластин нами был использован интерферометрический метод [1, 2]. Этот метод оказался удобным для получения информации о тех формах колебаний пьезопластин, у которых нормальные составляющие амплитуд больше  $1/4$  длины волны используемого света. Интерферометрический метод позволяет регистрировать на фотопленке амплитуды и фазы колебаний одновременно всех точек исследуемой вибрирующей поверхности и, таким

образом, дает возможность получать голограммы колебательных образов.

Получение голограмм становится возможным вследствие того, что тело, совершающее незатухающие механические колебания, большую часть времени пребывает в крайних положениях относительно своего состояния равновесия. Поэтому, когда тело колеблется на звуковых и ультразвуковых частотах, возникают стабильные колебательные образы. Пьезокварцевые пластины вследствие многомодальности их колебаний способны возбуждаться с образованием целых наборов таких колебательных образов, совершенно идентичных для каждого среза и несколько различающихся от среза к срезу. Рельеф колеблющейся поверхности зависит от типа колебания пьезопластины и от частоты. Этот рельеф устойчиво сохраняется в течение очень длительного времени ввиду большой

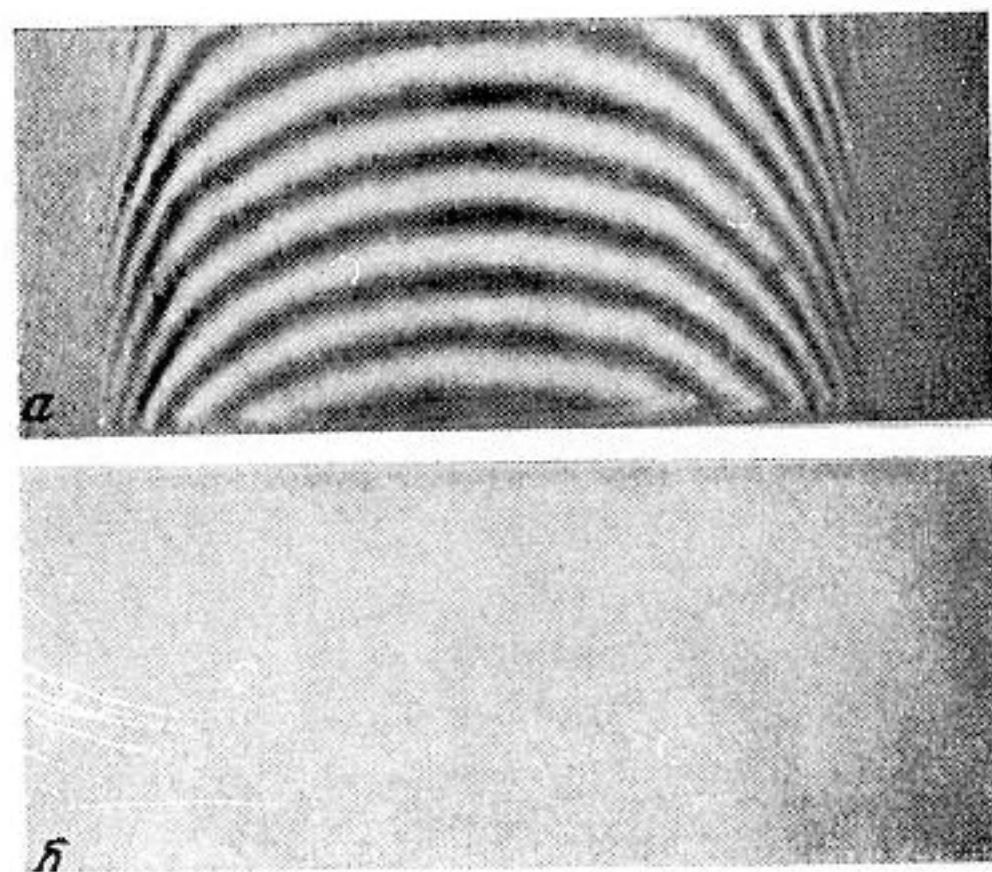


Фиг. 1

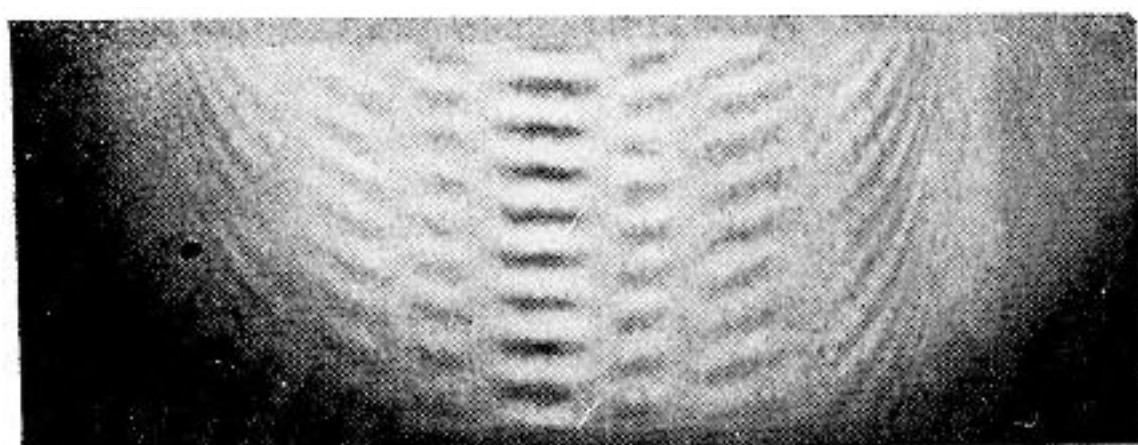
стабильности колебаний пьезопластин.

Как известно, визуализация колебаний представляет большие трудности [3]. Из всех существующих методов для визуализации колебаний пьезопластин наиболее пригодным оказался метод двухлучевой интерференции света, дающий возможность получать голограммы.

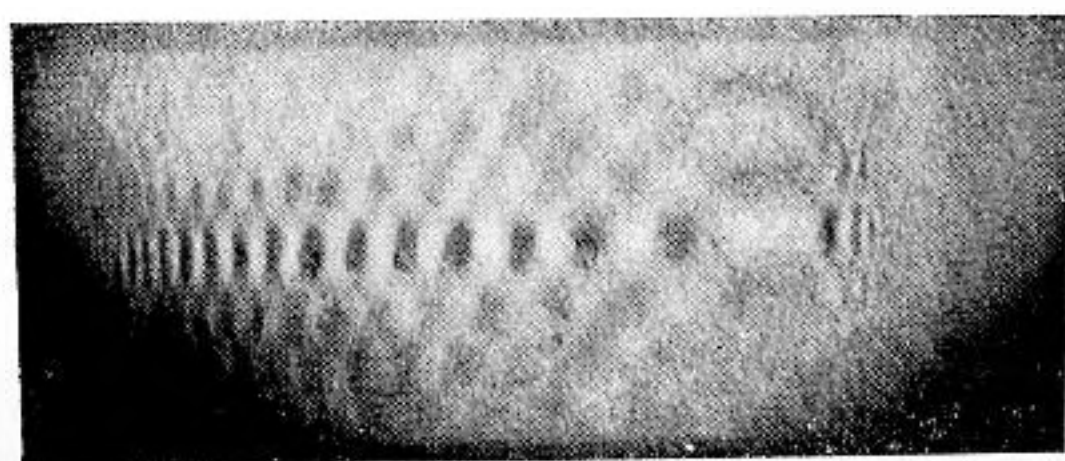
Для получения голограмм колебаний кварцевых пьезопластин был использован интерферометр Майкельсона. На фиг. 1 показана схема экспериментальной установки. Пьезопластина 1 возбуждалась при помощи



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



пары электродов 2. Лучи источника света 3, помещенного в фокальной плоскости линзы 4, пройдя через интерференционный кубик 5, отражались соответственно от поверхности пьезопластины 1 и от опорного зеркала 6. Объектив 7 служил для коллимирования волновых фронтов интерферирующих лучей и направления их с помощью призмы 8 в фокальную плоскость фотокамеры 9. Источником света была ртутная лампа ПРК-4, причем свет монохроматизировался при помощи селективного фильтра 10 из зеленого стекла. Длина световой волны составляла  $5,461 \cdot 10^{-5}$  см. Когерентность света достигалась путем использования участка светящейся поверхности, расположенной в фокальной плоскости линзы, создающей параллельный пучок лучей. Полупрозрачная зеркальная поверхность в диагональной плоскости интерференционного кубика делила падающий свет на два пучка, которые затем интерферировали, отразившись по отдельности от опорного зеркала и колеблющейся пьезопластинки; поверхности испытываемых пьезопластин подвергались оптической полировке и служили одним из зеркал в интерферометре Майкельсона. В каждой точке голограммы фиксировалась информация только от отдельных точек объекта; этим получаемая голограмма сходна с обычной фотографией, что позволяет уже на первой ступени процесса голографирования получать наглядное представление о зарегистрированном на голограмме колебательном образе. Поэтому голограммы использовались для получения фотоотпечатков, на которых отображались амплитудно-фазовые параметры всех точек колеблющейся поверхности. Перед получением интерференционной голограммы от колеблющегося тела регистрировалась интерференционная картина от поверхности покоящегося тела; обычно использовалась интерференционная картина полос равной толщины, которые соответствовали на поверхности пьезопластины местам одинаковой толщины клина, образованного этой поверхностью с референтной плоскостью опорного зеркала. Когда пьезопластина приходила в колебание, интерференционная картина в плоскости фотопленки возмущалась, и в зависимости от величины амплитуды колебаний наступало размытие или просветление интерференционных полос. На интерференционной картине местам с одинаковой амплитудой колебаний соответствовали места с одинаковой степенью освещенности, иначе говоря, оптическая интерференционная картина модулировалась механическими колебаниями пьезозеркала. Это означало, что интерференционные полосы равной толщины служили основой для образования голограмм равной амплитуды. При этом на интерферометрической голограмме регистрировались одновременно амплитуды и фазы колебаний всех точек поверхности колеблющейся пьезопластины. Если интенсивности опорной световой волны и световой волны, модулированной колебаниями пьезопластины, были равны, то лучи, приходившие к фотопленке в противофазе, полностью гасили друг друга, и поэтому пленка в этом месте оказывалась незасвеченной. И наоборот, когда интерферирующие волны приходили к пленке в фазе, происходило усиление света. Вследствие этого на голограмме места с равными фазами колебаний регистрировались как изофазные области. Амплитуда колебаний пьезопластины, зарегистрированная на голограмме, определялась как

$$r = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{R}{h}, \quad (1)$$

где  $r$  — амплитуда колебаний поверхности пьезопластины,  $\lambda$  — длина волны света,  $R$  — амплитуда колебаний интерференционной полосы,  $h$  — расстояние между полосами. Разность хода лучей, создаваемая колебаниями отражающей поверхности пьезопластины, была в 2 раза больше амплитуды колебаний пьезопластины.

Амплитудно-фазовая голограмма выглядит в виде изображения областей размытий и просветлений интерференционной картины. Узловые ли-

нии колеблющихся пьезопластин расположены на голограммах в местах с контрастными интерференционными полосами. В пучностях при увеличении амплитуды колебаний сначала наступает размытие интерференционных полос. Дальнейшее увеличение амплитуды вызывает просветление интерференционных полос, менее контрастное по сравнению с их видом в узловых областях и сдвинутое относительно них на полполосы. Еще большее увеличение амплитуды колебаний пьезопластины вызывает появление на том же изображении области второго размытия и так далее. Если пьезопластина совершает колебания с большой амплитудой, то на голограмме регистрируется последовательность размытий и просветлений интерференционных полос, причем области колеблющейся поверхности с большей амплитудой и фазой колебаний размещаются внутри остальных изоамплитудных и изофазных областей с меньшими амплитудами и фазами колебаний. Следовательно, размытия и сдвиги интерференционных полос являются результатом фазовой и амплитудной модуляции световой волны механическими колебаниями пьезопластины.

Фазу колебания любой точки пьезопластины легко определить численно, подставив значения порядкового номера размытия или просветления в этой точке и общего числа размытий или просветлений в данной области голограммы в одну из формул (2), (3), (4) или (5). Когда область максимума колебания размыта, надо пользоваться формулами:

$$\varphi_{p'} = \frac{\pi}{2(n - n' + 1)}, \quad (2)$$

$$\varphi_{np'} = \frac{\pi}{2(n - n') + 1}, \quad (3)$$

где  $n$  — общее число размытий,  $n'$  — порядковый номер соответственно области размытия или области просветления, фазу колебания которой необходимо определить. Когда область максимума колебаний пьезопластины просветлена, то для определения фаз колебаний отдельных областей колеблющейся поверхности нужно использовать формулы:

$$\varphi_{p''} = \frac{n'\pi}{2n + 1}, \quad (4)$$

$$\varphi_{np''} = \frac{(2n' + 1)\pi}{2(2n + 1)}, \quad (5)$$

где  $n$  — общее число просветлений,  $n'$  — порядковый номер данной области размытия или просветления.

Голограмма позволяет определять численные значения амплитуд любой точки колеблющейся поверхности, так как поверхности пьезопластины с различными амплитудами регистрируются на голограмме в виде размытий и просветлений разных порядков и контрастностей. Поскольку результирующая освещенность какой-либо точки колеблющейся пьезопластины является функцией амплитуды колебаний пластины, то интенсивности освещения отдельных мест голограммы, дающей изображение колебательного образа, можно выразить через значения амплитуд колебаний отдельных точек пьезопластины [4]:

$$I = I_0 \left[ 1 + J_0 \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right) \cos \frac{2\pi x}{h} \right], \quad (6)$$

где  $I_0$  — средняя интенсивность излучения одного пучка света,  $I$  — суммарная интенсивность двух пучков света,  $J_0(4\pi r / \lambda)$  — функция Бесселя нулевого порядка первого рода,  $x$  — расстояние измеренное перпендикулярно полосам,  $r$ ,  $h$  и  $\lambda$  — то же, что и в формуле (1). В приведенной

таблице даны значения амплитуд колебаний пьезопластины, порядки размытий и просветлений интерференционной картины и соответствующие им значения функции Бесселя. Пользуясь этой таблицей, можно установить амплитуды колебаний отдельных точек колеблющейся поверхности. Интерферометрическая голограмма с зарегистрированной на ней амплитудно-фазовой информацией позволяет автоматически распознавать тип колебаний пьезопластин [5].

Значения $J_0 \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right)$	$r/\lambda$	$r \cdot 10^{-5}$ , см	Порядок размытия и просветления
1-й максимум = 1,000	0,000	0,00	$I = 2I_0$
	0,000	0,191	1-е размытие
1-й минимум = -0,403	0,304	1,64	1-е просветление
	0,000	0,438	2-е размытие
2-й максимум = 0,3001	0,558	3,02	2-е просветление
	0,000	0,688	3-е размытие
2-й минимум = -0,2497	0,808	4,37	3-е просветление
	0,000	0,938	4-е размытие
3-й максимум = 0,218	1,049	5,67	4-е просветление
	0,000	1,189	5-е размытие
3-й минимум = -0,1956	1,315	7,10	5-е просветление
	0,000	1,440	6-е размытие
4-й максимум = 0,1793	1,56	8,43	6-е просветление

Исследованные нами пьезопластины представляли собой пластины различных срезов пьезокварца в виде прямоугольных параллелепипедов одинаковых размеров. Рассматривались колебания всех трех граней колеблющейся пластины. Комплексное [6] и совмещенное [1] исследование позволило установить типы колебаний пьезокварцевых пластин на всех их собственных частотах. Срезы пьезокварца имеют большую много-частотность [7, 8]; особенно многочастотен АТ-срез. При возбуждении в широком диапазоне радиочастот пьезопластины создают самые разнообразные колебательные образы. Эти образы можно классифицировать по типам совершаемых пьезопластинами колебаний и взаимным связям нескольких типов последних [9]. Взаимодействие нескольких типов колебаний происходит при совпадении основных частот одних типов колебаний с частотами мод других типов колебаний или при совпадении частот мод различных порядков для разных типов колебаний.

Приведем некоторые результаты интерферометрического исследования колебательных образов пьезоэлектрических кварцевых пластин. На основной частоте продольных колебаний пьезоэлектрической пластины АС-среза, равной 77422 гц, произошло полное размытие всех интерференционных полос (см. фиг. 2, б). Наблюдение колебаний велось с торца пьезопластины. Голограмма (фиг. 2, а) показывает, что все точки торцевой поверхности пьезопластины на этой частоте совершают синхронные колебания с амплитудой  $1,03 \cdot 10^{-5}$  см (см. табл.). Воспользовавшись формулой (2), легко определить фазы колебаний этих точек. При  $n = 1$ ,  $n' = 1$  (одно размытие) все точки торцевой поверхности пьезопластины в момент зарегистрированного колебательного состояния имеют одинаковые фазы, равные  $\pi/2$ . На всех остальных собственных частотах на голограммах колебаний регистрируются узловые линии, в которых интерференционные полосы во время колебания совершенно не подвергаются размытию (см. фиг. 3 и 4). На фиг. 3 показана голограмма колебаний той же пьезопластины АС-среза кварца на частоте 252986 гц связанных контурных колебаний. На ней ясно видны области четырех размытий и трех просветлений интерференционных полос. Узловая линия с неразмытыми интерференционными полосами проходит по середине исследуе-

мой поверхности параллельно толщине пластины. Наибольшая амплитуда колебаний пьезопластины равна  $5,07 \cdot 10^{-5}$  см (см. табл.). Фазы колебаний точек этой поверхности вычисляются по формулам (2) и (3). На фиг. 4 показана голограмма другого колебательного образа. Такой образ формируется на частоте 271156 гц. На этой частоте пьезопластина совершает сдвиговое колебание по толщине. Зафиксированная на голограмме наибольшая амплитуда равна  $5,67 \cdot 10^{-5}$  см. Узловая линия проходит параллельно ширине пластины; фазы колебаний точек определяются по формуле (4) или (5) в зависимости от их местоположения на колеблющейся поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Зонхиев, Л. Л. Мясников. О совмещении методов фигур Хладни и интерферометрического при исследовании амплитуды и формы колебаний пьезопластин. Акуст. ж., 1967, 13, 4, 628—629.
2. А. П. Громов, М. А. Зонхиев, Л. Л. Мясников, Е. Н. Мясникова, Б. А. Финагин. Автоматическое распознавание ультразвуковых интерференционных картин и голограмм. Тез. докл. совещ. по квант. акуст. и ультразвук. дефектоскопии, Вильнюс, 1967, 31.
3. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., ИЛ, 1957.
4. H. Osterberg. An interferometer method of studying the vibrations of an oscillating quartz plate. J. Opt. Soc. Amerika, 1932, 22, 19—35.
5. М. А. Зонхиев, Л. Л. Мясников. Алгоритмы хладниевых фигур. Тез. докл. научн.-техн. конфер. Ленингр. кораблестроит. ин-та, 1968, 204.
6. М. А. Зонхиев. Методы исследования формы и амплитуды колебаний пьезопластин. Сб. «Излучат. и приемн. ультразвук. колеб. и мет. измер. акуст. полей», ч. 1. Ленингр. дом научн.-техн. пропаганды, 1966, 50—55.
7. М. А. Зонхиев. Некоторые особенности колебаний пьезокварцевой пластинки АС-среза. Тез. докл. I Конференции молодых научных сотрудников Бурятского комплексного НИИ СО АН СССР, Улан-Удэ, 1962, 3.
8. М. А. Зонхиев. Тез. докл. II Конференции молодых научных сотрудников Бурятского комплексного НИИ СО АН СССР, Улан-Удэ, 1964, 16—17.
9. М. А. Зонхиев. О многоформенности паразитных колебаний, возбуждаемых в пьезоэлектрических пластинках. Тез. докл. научн.-техн. конференции Ленингр. обл. правл. научн.-техн. об-ва радиотехн. и электрон. им. А. С. Попова, 1967, 51.

Ленинградский кораблестроительный  
институт

Поступила в редакцию  
3 декабря 1968 г.