

05;07;08;11

# Голографические интерферограммы взаимодействующих радиальных мод свободного дискового резонатора из пьезокерамики

© В.А. Титов, С.М. Дмитриев

Волгоградский государственный университет  
e-mail: Detruanto@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 19 октября 2010 г.)

При электрическом возбуждении большим сигналом тонких пьезокерамических дисков из титаната бария и цирконата титаната свинца со сплошным электродом на частоте антирезонанса сосуществовали взаимодействующие радиальные моды, составлявшие единую моду. Визуализация колебаний поверхности осуществлена методом голографической интерферометрии.

## Введение

Довольно сложно синтезировать деформацию поверхности как нелинейную реакцию тонкого диска из керамического пьезоматериала на электрическое воздействие большого сигнала на частоте антирезонанса моды. Под большим для пьезокерамики понимается такой сигнал, при котором в пучностях моды при длительном воздействии саморазогрев столь велик, что достигается температура Кюри и происходит деполяризация керамики.

Как установлено в настоящей работе, возможна прямая регистрация деформации основания диска посредством применения для визуализации метода голографической интерферометрии (НИ) [1,2] в простой реализации — с He-Ne лазером ( $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ ). Рассматриваются только низкочастотные радиальные моды, их связь и взаимодействие между ними, возможность сосуществования и составления единых мод.

## Эксперимент

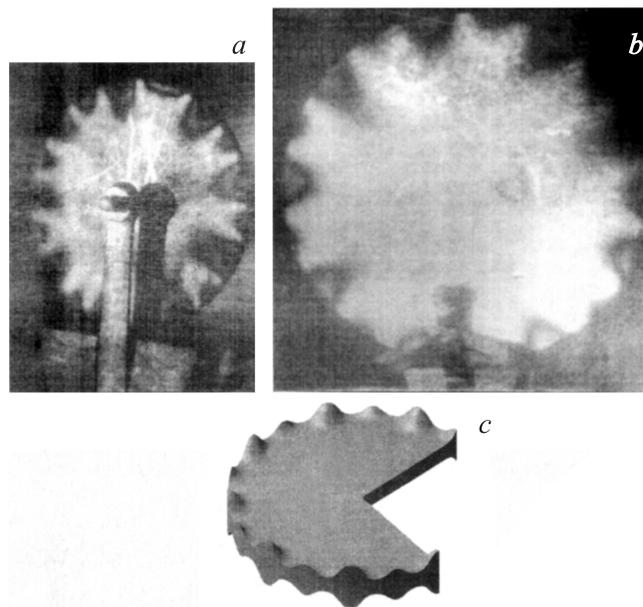
Опыты проводились с дисками, вектор поляризации которых формировался вдоль оси симметрии, а электроды покрывали полностью оба основания.

Электрическое возбуждение свободного дискового пьезорезонатора малым гармоническим сигналом меняющейся частоты в широком диапазоне позволило получить амплитудно-частотные характеристики активных при сплошном электроде низкочастотных радиальных мод (АЧХ-метод), а также заметно отстоящих высокочастотных толщинных мод. При необходимости уточнения численных значений частот первого и второго резонансов мод использовались фазочастотные характеристики (ФЧХ-метод).

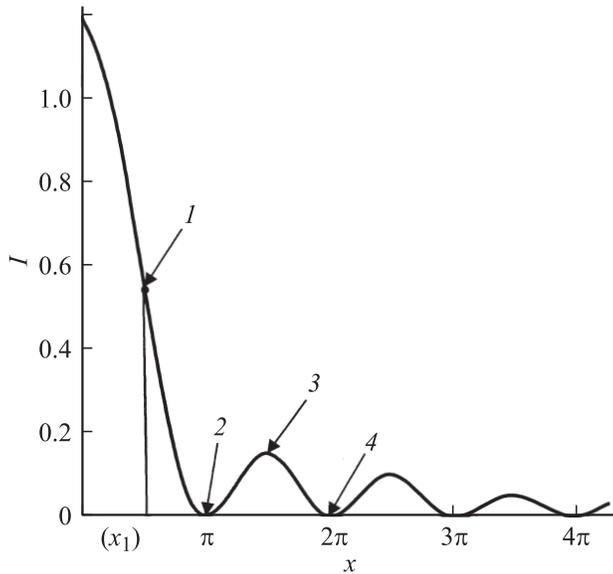
Из партии промышленных образцов отбирались наиболее оптимально заполяризованные пьезоэлементы и при голографировании возбуждались гармоническим сигналом большой амплитуды (режим большого сигнала — РБС). Отметим особенность, возникшую в конкретных обстоятельствах голографирования с

$\lambda = 0.63 \mu\text{m}$  — наблюдение было наиболее успешным на частотах второго резонанса (антирезонанса) основной радиальной моды и более высокой радиальной моды, самой активной на АЧХ после основной.

Применение РБС в течение 5 min давало заметные эффекты локального разогрева и деполяризации, поэтому диски использовались однократно. Реакция свободного пьезорезонатора (PR) на большой сигнал с электрической стороны сводится, во-первых, к появлению нелинейных членов в зависимости  $S(E)$ , где  $S$  — относи-



**Рис. 1.** *a* — голографическая интерферограмма НИ-1, полученная для диска диаметром 20 mm и толщиной 1 mm из пьезокерамики ТБК на частоте антирезонанса основной радиальной моды  $f_a = 109 \text{ kHz}$  при возбуждении электрическим полем напряженности  $E_0 = 250 \text{ V/cm}$ ; *b* — голографическая интерферограмма НИ-2 свободного дискового пьезокерамического резонатора диаметром 65 mm и толщиной 3 mm из керамики ЦТСНВ-1 на частоте антирезонанса основной радиальной моды  $f_a = 32 \text{ kHz}$  при возбуждении электрическим полем с  $E_0 = 85 \text{ V/cm}$ ; *c* — 3D реконструкция единой моды.



**Рис. 2.** Распределение интенсивности в восстановленном изображении объекта, движущегося во время экспозиции по гармоническому закону:  $I \sim J_0^2(x)$ , по оси абсцисс отложена величина  $x = 4\pi A/\lambda$ , где  $A$  — амплитуда колебаний поверхности,  $\lambda$  — длина волны излучения.

тельная деформация,  $E$  — напряженность электрического поля, во-вторых, к возрастанию диэлектрических потерь в пьезоматериале за один цикл переполяризации  $q = 2\pi\epsilon E^2 \cdot \text{tg}(\delta)$ .

Анализировались вибрации тонких дисков из пьезокерамики титаната бария (ТБК) и цирконата-титаната свинца (ЦТС). На рис. 1, *a* представлена голографическая интерферограмма НИ-1, полученная для диска диаметром  $D = 20$  мм и толщиной  $d = 1$  мм PR1 из ТБК на частоте антирезонанса  $f_a = 109$  кГц при возбуждении электрическим полем с амплитудой напряженности  $E_0 \approx 250$  В/см. Диск закреплялся в пружинящем держателе, конструкция которого хорошо видна на рис. 1. На рис. 1, *b* представлена НИ-2, полученная для диска большего диаметра  $D = 65$  мм и большей толщины  $d = 3$  мм (PR2) из материала ЦТСНВ-1, при возбуждении на частоте антирезонанса  $f_a = 32$  кГц полем с амплитудой  $E_0 = 85$  В/см. В обоих случаях использовался один и тот же держатель. Электрическое возбуждение свободных дисковых резонаторов большим сигналом позволило, во-первых, получить достаточные для метода НИ с  $\delta = 0.63$  мкм амплитуды колебаний поверхности и, во-вторых, обеспечить решение основной задачи — возбуждение связанных мод.

Вожженные серебряные электроды полностью покрывали поверхности оснований дисков, предоставляя неплохие условия для голографирования (неполированное серебряное зеркало). Регистрировались френелевские образы светового поля в тонких галогенидо-серебряных слоях с временем экспозиции  $t_e = 100$  с. Пауэлл и Стетсон предложили голографический метод усреднения во времени для анализа вибрации [3], поз-

воляющий регистрировать комплексные амплитуды объектов световых волн. Длительность экспозиции должна значительно превышать период колебаний  $T$ , тогда на голограмме будут зарегистрированы волны, рассеянные от поверхности объекта, проходящей всю совокупность состояний при вибрации. При восстановлении они будут интерферировать соответственно своей доле времени в общей экспозиции. Интенсивность света  $I(x, y)$  на восстановленном изображении в разных точках исследуемой поверхности в зависимости от амплитуды колебаний в них распределяется так [3]

$$I(x, y) \sim a^2 J_0^2 \left[ \frac{2\pi A(x, y)}{\lambda} (\cos(\varphi_1) + \cos(\varphi_2)) \right],$$

где  $a$  — модуль комплексной амплитуды световой волны,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — углы, составленные вектором скорости в точке  $(x, y)$  с направлениями падающего и отраженного лучей,  $A(x, y)$  — амплитуда колебания точки поверхности,  $\lambda$  — длина волны лазера.

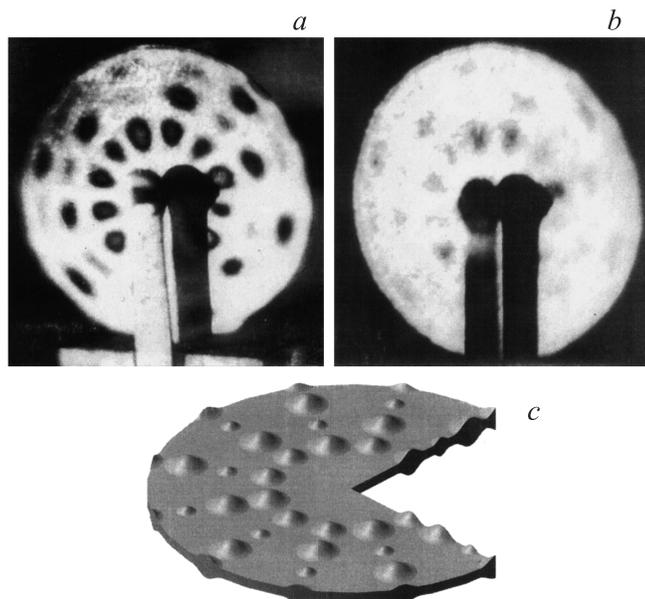
График  $J_0^2(x)$  с отметками 1, 2, 3, 4 представлен на рис. 2. Использовался He-Ne лазер с  $\lambda = 0.63$  мкм и длиной когерентности 15 см.

## Обсуждение результатов

Отличительной особенностью опытов являлось применение РБС. При введении пьезоматериала в состояние насыщения для электрического смещения  $D$  в нем формировался меандр со спектром частот достаточно богатым, чтобы возбудить часть радиальных мод. Те из радиальных мод, которые составляют единую моду, имеют наилучший коэффициент связи между собой. Делалось естественное предположение, что определяющим фактором будет топологическая совмещаемость мод. Для каких именно мод она является наилучшей выяснилось в натурном эксперименте. Рассматривается взаимодействие парциальных колебаний одного вида — радиальных. Выявлены предпочтения во взаимодействии между модами, индексы которых определены по голографической интерферограмме.

Точки вибрирующей поверхности, для которых разность хода рассеянных световых волн в амплитудных положениях составляет нечетное число полувольт, дают минимумы интенсивности, т.е. по ним проходят середины темных полос на восстановленной голографической интерферограмме.

Для мод, устанавливающихся на свободном диске на частоте второго резонанса (антирезонанса)  $f_a$ , результаты голографирования для двух видов дисков, отличающихся пьезоматериалом и геометрическими размерами (диаметр и толщина), приведены на рис. 1, *a, b*. Как и ожидалось, результаты НИ-1 и НИ-2 качественно совпадают, они получены для PR1 и PR2 из разных пьезоке-рамики, при разных напряженностях полей и на разных частотах. Так выглядят основная радиальная мода и сопутствующая ей в антирезонансе. По сравнению с модой



**Рис. 3.** *a* — голографическая интерферограмма НИ-3 высокой радиальной моды тонкого пьезокерамического диска  $D = 20$  mm,  $d = 1$  mm из ТБК на частоте антирезонанса  $f_a = 290$  kHz при возбуждении электрическим полем с  $E_0 = 250$  V/cm; *b* — голографическая интерферограмма НИ-4 активной высокой радиальной моды тонкого пьезокерамического диска  $D = 20$  mm,  $d = 1$  mm из ТБК на частоте резонансного  $f_p = 289$  kHz при возбуждении электрическим полем с  $E_0 = 250$  V/cm. *c* — 3D реконструкция единой моды.

в резонансе реализуется следующее (близкое по частоте отсечки) решение поперечного волнового уравнения, в котором радиальное распределение амплитуды смещения соответствует ходу функции Бесселя 1-го порядка, первый горб которой попадает на границу диска. Азимутальное распределение показывает, что возбуждаются две близкие по топологии моды, азимутальные индексы которых различаются в два раза: 9 и 18. На малом диске PR1 (рис. 1, *a*) распределение интенсивности в восстановленном изображении достигает точки 4 на графике рис. 2, т. е. соответствует второй темной полосе. На этом основании сделано утверждение, что амплитуда смещения в этих точках границы диска достигает значения  $\frac{\lambda}{2} = 0.32 \mu$ . На большом диске PR2 приведенная амплитуда в соответствующих точках находится в пределах  $\frac{\lambda}{4} < A^* < \frac{\lambda}{2}$ . Деформация поверхности основания диска при большом сигнале соответствует сосуществованию мод, не запрещенных принципом компенсации зарядов сплошным электродом. В работе не предлагаются количественные меры коэффициентов связи.

Перейдем к обсуждению другого опыта. Диск PR1 диаметром 20 mm исследовался на более высокой радиальной моде, выделяющейся своей активностью. Приведенная на рис. 3, *a* голографическая интерферограмма НИ-3 получена на частоте антирезонанса  $f_a = 290$  kHz, а на рис. 3, *b* показана НИ-4, полученная на частоте резонанса  $f_r = 289$  kHz. На НИ-3 в антирезонансе видно,

что реализуется решение поперечного волнового уравнения, в котором в радиальном распределении амплитуды смещения  $A$  захватываются 4 горба функции Бесселя 1-го порядка (4-й горб приходится на границу диска), а в азимутальном распределении просматриваются две моды, азимутальные индексы которых 6 и 12. Моды сосуществуют, интерферируют, составляют единую моду.

В известном решении поперечного волнового уравнения для свободного диска на частоте первого резонанса ( $f_r$ ) основной радиальной моды радиальное распределение амплитуды смещения  $A$  описывается функцией Бесселя нулевого порядка — движение средней части площади основания диска напоминает поршневую моду. При этом площади значительные, а амплитуды малые. Визуализация этой моды с использованием метода НИ в настоящей работе показала картину, представляющую слабое серое пятно в форме круга в середине основания диска, если возбуждение слабее РБС. Интенсивность света в восстановленном изображении находилась на отметке 1 графика, приведенного на рис. 2. Ввиду низкой информативности такая голограмма в работе не приведена. На рис. 3, *b* представлена голографическая интерферограмма НИ-4, полученная в РБС и соответствующая форсированным колебаниям в резонансе на  $f_r$ . Удивительно, что интерферограмма содержит „следы“ того, что есть в НИ-3, полученной на  $f_a$ , но, по видимому, основная часть энергии уходит на раскачку большой площади в средней части диска с небольшой амплитудой, что соответствует радиальному распределению по функции Бесселя нулевого порядка, но с захватом второго, третьего и, возможно, четвертого ее горба. При этом должны возникать центральное пятно и кольца, противофазные друг другу. Однако детализация осталась за пределами чувствительности примененной реализации метода ( $\lambda = 0.63 \mu$ ). Можно сделать предположение о том, что следы НИ-3 на НИ-4 есть „раскачка“ иной моды по частоте несколько более высокой, чем  $f_r$ , т. е. на  $f_a$ , что может быть объяснено проявлением нелинейности  $S(E)$  и соответственно обогащением спектра.

## Заключение

В работе получены радиальные и азимутальные распределения смещений точек на основаниях свободных дисков со сплошным электродом в единых модах, электрически возбуждаемых в антирезонансе основной радиальной моды, с точным указанием радиальных и азимутальных индексов их парциальных компонентов. Выделена наиболее активная, после основной, высокая радиальная мода и также на частоте антирезонанса визуализирована сложная единая радиальная мода с точным указанием индексов ее компонентов, не запрещенных принципом компенсации зарядов при сплошном электроде. На рис. 1, 3, *c* приведены 3D реконструкции единых мод.

## Список литературы

- [1] *Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В.* Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 299 с.
- [2] *Бутусов М.М., Белгородский Б.А.* Голографический анализ электромеханических преобразователей. Л. ЛДНТП, 1974. 15 с.
- [3] *Powell R.L., Stetson K.A.* // JOSA. Vol. 55. 1965. P. 1593;  
*Stetson K.A., Powell R.L.* // Ibid. P. 1694.