

05;07;12

Исследование возможности управления соотношением энергий сдвига и изгиба при колебаниях тонкой сдвиговой пьезоэлектрической пластины путем изменения формы электродов

© В.А. Титов

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

(Поступило в Редакцию 16 июня 2009 г. В окончательной редакции 29 октября 2009 г.)

Для сдвиговой пьезопластины из керамики ЦТС (PZT) на основании визуализации изгибов поверхности методом голографической интерферометрии и измерений амплитудно-частотных характеристик предложены варианты модификации электродов для изменения соотношения значений энергий компонентов единой изгибно-сдвиговой моды. Предложены простые модельные представления для единой моды.

В сдвиговой пьезопластине из керамики со сплошными электродами одновременно со сдвиговыми возникают колебания изгиба [1]. Такой пьезоэлемент можно назвать сдвигово-изгибным. Здесь изгибы не определяют принципа действия резонатора и потому считаются сопутствующими. В частности, они создают помеху для точного измерения частоты первого и второго резонансов сдвиговой моды (f_r и f_a , соответственно) [2].

В случае возможного применения такого пьезоэлемента в качестве силового пьезопривода может возникнуть необходимость управления соотношением энергий связанных парциальных сдвиговой и изгибной мод. При целенаправленном возбуждении не сдвиговой, а изгибной моды как основной, для чего требуются специальные электроды, сдвиговая ТТ-мода будет существовать как сопутствующая, с меньшей энергией.

Цель настоящей работы — обсуждение возможностей управления соотношением энергий двух компонентов изгибной и сдвиговой в единой изгибно-сдвиговой моде. В работе предлагается осуществлять управление посредством нанесения на поверхность сдвиговой пьезопластины электродов возбуждения измененной формы. Экспериментальным основанием для выбора формы электродов служили исследования вибрирующего пьезоэлемента (ПЭ) со сплошным электродом методом голографической интерферометрии (ГИ) и измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в частотном промежутке основной сдвиговой моды.

Для экспериментального исследования выбрана пьезопластина из керамики цирконата-титана свинца ЦТС-24 размером $8 \times 5.5 \times 0.2$ мм, на которой сплошные электроды нанесены от края до края на грани 8×5.5 мм, поляризация \mathbf{P} перпендикулярна граням 5.5×0.2 мм. Возбуждение ПЭ высокочастотным электрическим сигналом производилось на частоте первого резонанса основной сдвиговой моды: $f_r = 4195$ kHz.

Визуализация изгиба поверхности широкой грани (8×5.5 мм) осуществлена методом голографической интерферометрии с усреднением во времени [3] с

применением He-Ne-лазера ($\lambda = 0.63$ мкм). Время экспозиции t значительно превышало период T колебаний вибрирующего ПЭ ($t \approx 60$ с; $T = 2 \cdot 10^{-7}$ с). При этом достаточные для регистрации амплитуды изгибов $A_f \approx \lambda/4 = 0.16$ мкм получены кратковременным, в течение 60 с, применением режима большого сигнала для специально отобранного активного ПЭ. Под режимом большого сигнала понимается электрическое возбуждение ПЭ переменными полями с напряженностью, которые в течение 10 мин деполяризуют ПЭ.

На рис. 1 представлена голографическая интерферограмма изгибной моды пьезоэлемента 1, закрепленного в держателе 2. Подбор образца из партии серийных изделий сделан на основании измерения амплитудно-

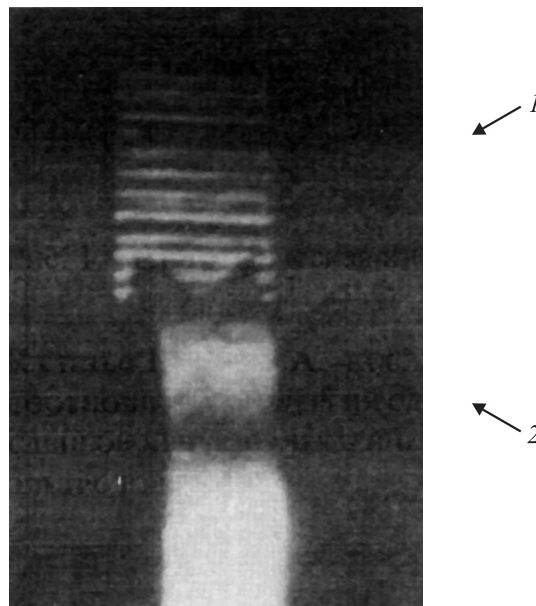


Рис. 1. Голографическая интерферограмма стоячей волны изгиба поверхности сдвиговой пьезокерамической пластины. Мелкая сетка эквидистантных темных полос на пьезоэлементе соответствует расположению пучностей стоячей волны изгиба, сетки светлых полос — положению узлов.

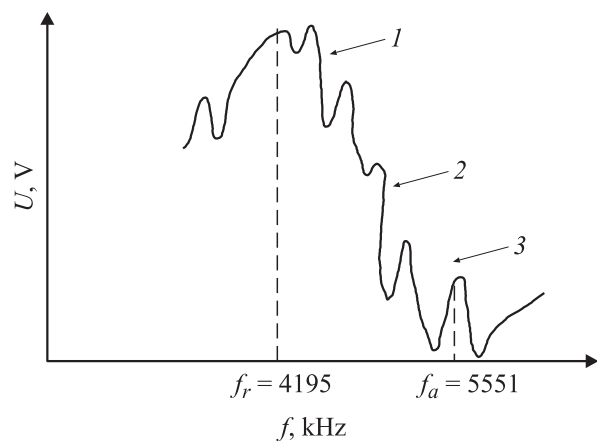


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика сдвигово-изгибного пьезоэлемента в частотном промежутке основной сдвиговой моды. 1, 2, 3 — изгибные моды (соответственно 15, 17, 19).

частотных характеристик основной моды сдвига резонаторов в интервале значений частоты между первым и вторым резонансами (рис. 2).

На АЧХ видна немонотонность резонатора, т.е. проявление сопутствующих сдвигу колебаний другого типа — изгиба. Причем в частотном промежутке сдвига возбуждается несколько изгибных мод: тринадцатая, пятнадцатая, семнадцатая, девятнадцатая. Требованием к отбору образца было размещение первого резонанса одной из изгибных мод вблизи первого резонанса сдвига. Такое совпадение пришлось на 15-ю моду, как это показано на рис. 2 для номера 1.

Таким образом, в отобранном для регистрации ГИ резонаторе были активными две моды при возбуждении на частоте 4195 kHz. Сдвиг не визуализировался ГИ, а для изгибов получена сетка эквидистантных темных полос (см. рис. 1). Обсуждая голографическую интерферограмму как прямое измерение распределения амплитуд нормальных деформаций широкой грани ПЭ, можно утверждать, что обнаруживающиеся на АЧХ побочные колебания есть колебания изгиба и только они. Темные полосы на голографической интерферограмме представляют собой пучности стоячей волны изгиба поверхности, освещаемой объектным пучком при голографировании. Возможны два варианта изгиба на противоположной стороне.

Далее будут развиты модельные представления, позволяющие, в частности, отдать предпочтение вибрации толщины. Расположение полос на пластине позволяет указать направление волнового вектора \mathbf{k} изгибной волны, перпендикулярного к ним и коллинеарного к вектору поляризации \mathbf{P} в ПЭ. Действительно, на рис. 1 вектор \mathbf{P} направлен от держателя вдоль широкой стороны. Количество мелких темных полос — 15 (число нечетное). Они размещены на отрезке длиной 8 мм, что позволяет определить длину волны изгибной моды ПЭ.

Поскольку устанавливалась частота генератора возбуждения 4195 kHz, то скорость распространения изгибной волны $V_f = 4.45 \cdot 10^3$ m/s. Такой результат хорошо согласуется с известными данными для материала ЦТС-24 [4]. Несколько искажает представленную ГИ зафиксированное на ней изгибное колебание всей системы „ПЭ + держатель“, оно накладывается на сетку мелких полос.

Переходя к модельным представлениям, рассмотрим грань пьезопластины 8×0.2 mm. На рис. 3 ось x направлена вдоль длинной стороны и совпадает с направлением вектора \mathbf{P} , созданного в процессе поляризации ПЭ. При процедуре поляризации исходно изотропная поликристаллическая структура керамики приобретает выделенное направление, заданное внешним поляризующим полем \mathbf{E}_0 , причем полная поляризация предполагает переориентацию 180-градусных доменов (1) и касается только 12% 90-градусных доменов (см. 2 на рис. 3) [4]. К готовому ПЭ прикладывается переменное высокочастотное возбуждающее поле E_{HF} , ориентированное вдоль оси y . Возбуждающее поле создает колебания доменов типа 2 и опосредовано по механическому каналу (через деформацию) доменов типа 1 с ортогональной ориентацией. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний в среде дает эллиптические траектории движения точек внутри нее.

Далее для бегущей волны предполагается аналогия с качеством эллиптического цилиндра с малым эксцентриситетом (ϵ) эллипса в основании. Эксцентриситет ϵ можно оценить, так как известна толщина пластины (d) и прямо измерена на ГИ амплитуда колебаний изгиба поверхности (A_f). При большом сигнале: $\epsilon \approx 8 \cdot 10^{-2}$.

На рис. 4 проиллюстрированы детали процесса качения виртуального эллиптического цилиндра: 1 — возникновение крутящего момента сил M для поляризованного объекта при воздействии поля E_{HF} ; 2 — сдвиговая скорость верхней точки B относительно неподвижного основания при $\epsilon = 0$; 3 — характер изгибной деформации на противоположных поверхностях при „качении эллиптического цилиндра“ ($\epsilon > 0$). Развивая аналогию с качением эллиптического цилиндра, следует отметить,

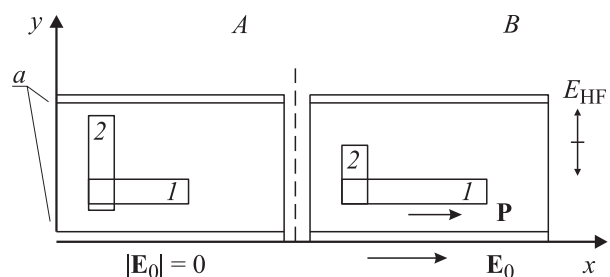


Рис. 3. Сечение x - y пьезопластины: 1, 2 — домены ортогональных ориентаций, \mathbf{E}_0 — внешнее поляризующее поле, E_{HF} — возбуждающее гармоническое высокочастотное поле; a — сплошные электроды возбуждения. На вставке А — пьезопластина до поляризации; на вставке В — после поляризации.

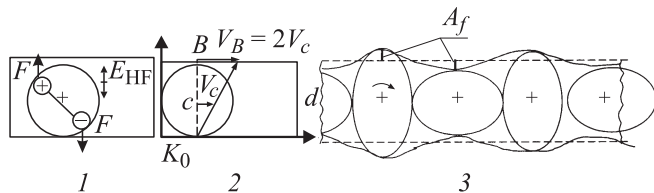


Рис. 4. Аналогия с качением эллиптического цилиндра: 1 — возникновение крутящего момента сил в поле E_{HF} ; 2 — сдвиговое колебание; сдвиговая скорость точек поверхности (V_B); 3 — изгибная деформация противоположных поверхностей пьезопластины типа „вибрация толщины“ (симметричная мода Лэмба) при качении эллиптического цилиндра; A_f — амплитуда колебаний изгиба поверхности; K_0 — система отсчета, связанная с нижним основанием пластины.

что установившаяся скорость V_c поступательного движения центра (c) есть скорость бегущей волны изгиба поверхности (она определена с привлечением результата голографирования). Работа раскручивания эллиптического цилиндра $A = \int M d\varphi$, где φ — угол поворота. Крутящий момент тем больше, чем больше эксцентриситет ε , так как в пьезосреде, возбуждаемой переменным электрическим полем, виртуальный эллиптический цилиндр имеет электрический дипольный момент, который возрастает с увеличением ε .

Следует ввести эффективные меры инертности эллиптического цилиндра (поскольку нет реального переноса массы частиц) — эффективную массу и эффективный момент инерции. Момент инерции тоже связан с ε . За счет внутреннего трения при деформировании действует тормозящий момент сил — M_f . В установившемся режиме качения $\Sigma M_i = 0$, т.е. $M = M_f$. Если возрастает работа кручения, то на основании теоремы о кинетической энергии возрастает кинетическая энергия катящегося эллиптического цилиндра и соответственно увеличивается доля энергии изгибной моды в единой моде. Энергия перераспределяется между компонентами — парциальными модами.

Возможности управления энергетическими долями парциальных мод связываются в данной работе с использованием специальных электродов. Предлагаемая форма электродов — электродная решетка с определенным шагом — продиктована голографической интерферограммой пьезопластины с изгибной модой. Рассмотренная модель не имеет трудностей на краю пластины, здесь величина изменения импульса (Δp) катящегося цилиндра $\Delta p = 2p$, и должна возникнуть двойная деформация, что и устанавливается во всех пучностях стоячей волны изгиба.

Возвращаясь к анализу сетки мелких темных полос на ГИ, отметим, что на краях пластины должны быть темные полосы, т.е. пучности стоячей волны изгиба, а соответствующие точки поверхности при своем движении описывают эллиптические траектории. Указанный характер движения края пластины открывает возможно-

сти практического применения ПЭ в качестве пьезопривода, в частности, пьезопривода режущего инструмента в силовой литографии.

Для практического изменения соотношения энергий в сдвиговой и изгибной компонентах единой моды посредством изменения формы электродов возбуждения использованы три физических эффекта:

- 1) фазовый синхронизм в пучностях стоячей волны изгиба;
- 2) компенсация зарядов для изгибной моды при укороченном электроде [5];
- 3) эффект захвата энергии сдвиговой моды [6].

В случае замены сплошного электрода на электродную решетку, приведенную на рис. 5, штыри, образующие решетку, повторяют сетку эквидистантных темных полос на голографической интерферограмме (см. рис. 1). Штыри расположены в пучностях стоячей волны изгиба. Расстояние между серединами штырей равно $\lambda/2$ стоячей волны изгиба. Электродная решетка возбуждает изгибную моду. Однородное по оси x (см. рис. 3) возбуждающее высокочастотное поле заменяется на неоднородное регулярное. Активизируется изгибная мода, а сдвиговая сосуществует в ослабленном виде. Возможны замены двух сплошных электродов на электродную решетку или замена только одного, второй при этом остается сплошным. Ширина металлизированного штыря влияет на активность сдвига за счет проявления эффекта захвата энергии сдвиговой моды. Поскольку прямо возбуждаемым является изгиб, а сдвиг возникает как сопутствующий, то ПЭ с электродной решеткой можно считать изгибно-сдвиговым.

Селективное ослабление отдельной изгибной моды из указанных четырех (13, 15, 17, 19) достигалось посредством применения укороченного сплошного электрода благодаря проявлению эффекта компенсации зарядов. Так, например, для подавления 15-й моды изгиба был применен сплошной электрод, укороченный на $\lambda/4$ от каждого края вдоль длинной стороны (8 мм) широкой грани пьезопластины, где λ — длина волны 15-й изгибной моды. Активность моды была ослаблена более чем в 10 раз.

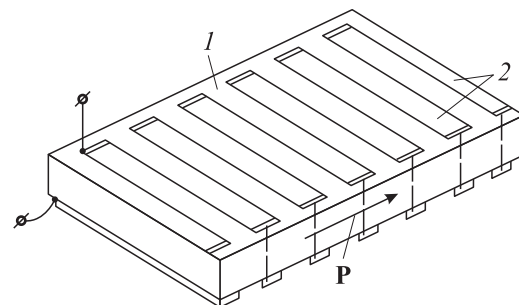


Рис. 5. Электродная решетка для возбуждения изгибной моды в изгибно-сдвиговом пьезоэлементе: 1 — суммирующий электрод; 2 — штыри, образующие электродную решетку.

Ослабление всех изгибных мод, показанных на АЧХ без селекции (рис. 2), осуществлялось посредством применения сплошного электрода, площадь которого меньше площади большой грани пьезопластины. Таким образом создавалась полоска неметаллизированной пассивной зоны шириной 1–1.5 mm по всему периметру грани, которая ослабляет все изгибные моды. В результате измерения АЧХ было установлено ослабление 13-, 15-, 17- и 19-й изгибных мод примерно в 3 раза. Проявление эффекта захвата энергии сдвига и ослабление изгибов в пассивной зоне используется на практике уже давно.

В результате проведенного исследования было показано, что соотношение энергий сдвига и изгиба, возбуждаемых в пьезопластине рассмотренного типа, может быть изменено как в сторону ослабления изгибов, так и в сторону их активизации посредством применения электродов специальной формы.

Список литературы

- [1] Sykes R. // Bell System Techn. J. 1944. Vol. 23. P. 178–189.
- [2] Лучанинов А.Г., Титов В.А., Шипкова И.Ю. / А.с. № 951169. СССР. Способ измерения резонансной и антирезонансной частот пьезоэлектрических резонаторов. 1982. Бюл. № 30.
- [3] Островский И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 299 с.
- [4] Яффе Б., Кук Н., Яффе Г. Пьезоэлектрическая керамика. М.: Мир, 1974. 288 с.
- [5] Справочник по кварцевым резонаторам / Под ред. П.Г. Позднякова. М.: Связь, 1978. 288 с.
- [6] Кантор В.М. Монолитные пьезокерамические фильтры. М.: Связь, 1977. 152 с.