

6. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 2. М.: Машиностроение, 2008.

7. Alekseenko S. V., Bilsky A. V., Dulin V. M., Markovich D. M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // Int. J. Heat Fluid Flow. 2007. V. 28. P. 1340—1359.

8. Alekseenko S. V., Antipin V. A., Bobylev A. V., Markovich D. M. Application of PIV to velocity measurements in a liquid film flowing down an inclined cylinder // Exp. Fluids. 2007. V. 43. N. 2—3. P. 197—207.

9. Вараксин А. Ю., Полежаев Ю. В., Поляков А. Ф. Экспериментальное исследование влияния твердых частиц на турбулентное течение воздуха в трубе // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36. № 5. С. 767—775.

10. Hout van R. Time-resolved PIV measurements of the interaction of polystyrene beads with near-wall-coherent structures in a turbulent channel flow // Int. J. Multiphase Flow. 2011. V. 37. P. 346—357.

11. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. К вопросу управления поведением воздушных смерчей // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 6. С. 870—876.

12. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н., Таекин С. И. Параметры неустойчивой стратификации воздуха, приводящей к генерации свободных вихрей // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 2. С. 269—273.

13. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. О возможностях визуализации при моделировании воздушных смерчей // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 4. С. 617—622.

14. Varaksin A. Y., Romash M. E., Kopeitsev V. N., Gorbachev M. A. Experimental study of wall-free non-stationary vortices generation due to air unstable stratification // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 6567—6572.

15. Varaksin A. Y., Romash M. E., Kopeitsev V. N. Effect of net structures on wall-free non-stationary air heat vortices // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 64. P. 817—828.

Дата принятия 16.01.2015 г.

51-74:681.5.08

Применение пьезоструктур для создания струнного измерительного преобразователя на основе автоколебательной системы

Е. В. КУЧУМОВ¹, И. Н. БАРИНОВ¹, В. С. ВОЛКОВ¹, С. А. ГУРИН¹,
С. П. ЕВДОКИМОВ²

¹ Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия, e-mail: evgenii_kuchumov@mail.ru

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Описан принцип действия микроэлектромеханической автоколебательной системы на основе струнного чувствительного элемента с применением монокристаллического кремния и пьезокерамических пленок. Приведены результаты предварительного (качественного) моделирования такой системы, описаны ее особенности.

Ключевые слова: автоколебания, пьезоматериалы, струнный преобразователь, моделирование, динамика колебаний.

The principle of operation of microelectromechanical self-maintained system based on a string sensitive element with use of a single-crystal silicon and piezoelectric films is described. The results of preliminary (qualitative) modeling of self-oscillatory system are presented and its certain features are described.

Key words: autooscillations, piezomaterials, string converter, modeling, oscillation dynamics.

В настоящее время структуры на основе пьезоматериалов находят применение в различных областях, связанных с мониторингом и контролем колебательных или периодических движений различных конструкций [1, 2]. Такие структуры можно использовать не только для виброгашения или управления заданными режимами деформаций. Применение пьезоматериалов актуально при создании новых чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков физических величин на основе монокристаллического кремния, карбида кремния и т. д. В статье представлен предварительный анализ струнного (частотного) ЧЭ из кристаллического кремния, имеющего пьезоструктуру на основе пленок из цирконат-титанат

свинца (ЦТС) $\text{PbZr}_{0,48}\text{Ti}_{0,52}\text{O}_3$ и работающего в режиме автогенератора.

Основное преимущество электромеханических систем колебаний — более высокая добротность (до 10^4 и выше) по сравнению с электрическими колебательными системами, где она достигает лишь нескольких сотен [3]. В то же время точность измерений электромеханического преобразователя существенно выше, чем у механического или даже электрического.

Обоснование подхода. Большинство струнных преобразователей изготавливают из проводящего материала, например магнитного, что связано со способом возбуждения ко-

лебаний струны и снятия выходного сигнала [4—6]. Наибольшее распространение получили электромагнитный и магнитоэлектрический способы, а также, в меньшей степени, электростатический (емкостной). Все указанные измерительные системы являются обратимыми, как и система с кварцевым пьезоэлементом, не получившая широкого распространения, в которой струну можно выполнить из любого непроводящего достаточно упругого, гибкого и устойчивого материала. При изготовлении преобразователей такого типа обязательное условие — применение технологии соединения струны с пьезоэлементом для обеспечения как высокой устойчивости к механическим вибрациям, так и симметрии колебательного движения. Развитие технологии напыления ЦТС-пьезопленок позволяет избежать этих трудностей, и создать конструкции струнных ЧЭ с улучшенными характеристиками.

Авторы предлагают оригинальную схему электромеханического автогенератора (рис. 1) с применением пьезоматериала, отличающуюся от существующих аналогов. Механическая часть колебательной системы состоит из рамки жесткости 2, являющейся упругим преобразователем силы в деформацию и одновременно выполняющей роль держателей струны (см. рис. 1, а), и непосредственно ЧЭ — самой струны 1 (см. рис. 1, б). В качестве материала струны использован монокристаллический кремний, обладающий следующими преимуществами:

минимальное число структурных дефектов по сравнению с аморфным или поликристаллическим веществами;

возможность использования анизотропии свойств (механических, электрических и т. д.) для повышения симметрии колебательных движений;

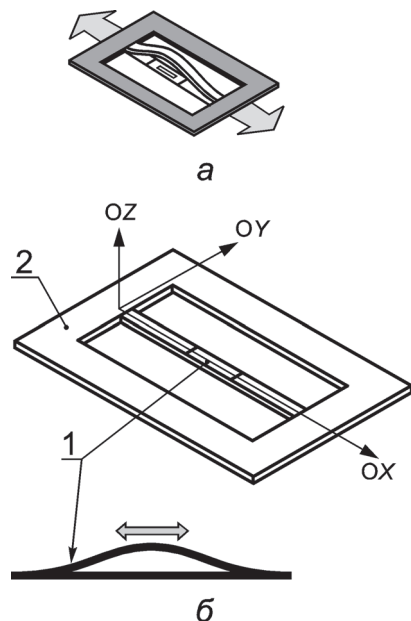


Рис. 1. Базовая (принципиальная) конструкция струнного чувствительного элемента из монокристаллического кремния:

а — общий вид колебательной (резонансной) системы автогенератора с направлением кристаллографических осей монокристаллического кремния, совпадающих с координатной системой для моделирования динамики струны; б — основной колебательный режим автогенератора, характеризуемый центральным расположением пьезоактюатора на струне; 1 — пьезоактюатор; 2 — рамка жесткости

допустимость применения стандартных методов микроэлектроники для создания конструкции измерительных и управляющих элементов;

небольшой разброс параметров монокристаллических материалов, обеспечивающий более стабильные метрологические характеристики ЧЭ.

Кроме перечисленных достоинств монокристаллическая структура позволяет существенно снизить или вообще исключить влияние таких механических свойств поликристаллических материалов, как упругое и неупругое механическое последствие, ползучесть и т. п. Существование обширной междолинной границы и скопления кристаллических дефектов-дислокаций на ней приводит к возникновению и развитию указанных эффектов.

Уравнения динамики кремниевой струны. Рассмотрим прямоугольное сечение реальной струны, когда ось симметрии совпадает, например, с кристаллографическим направлением [100] и осью OX, а направления [010], [001] (оси OY, OZ, соответственно) перпендикулярны сторонам поперечного сечения струны (см. рис. 1, б).

В дальнейшем для расчета реальной струны будем использовать модель упругой балки, применяемую при изучении вибростержневых систем [3], так как математически не сложно совершить переход к модели идеальной струны с уменьшенной площадью поперечного сечения по отношению к длине или сниженной изгибной жесткостью. Далее, говоря про струну, будем подразумевать реальную струну, эквивалентную балке малых размеров.

Таким образом, колебание вдоль одной из плоскостей симметрии струны является механической деформацией вдоль одной из кристаллических осей кремния, следовательно, можно рассматривать классическое уравнение колебаний с механическими свойствами вдоль данной оси кристалла. Для выполнения условия стабильности колебаний можно подобрать пропорции струны так, чтобы придать ей форму ленты [3].

Уравнение динамики струны переменного сечения из однородного изотропного материала при растягивающей N и распределенной силе f имеет вид

$$\rho_0 F u'' + (J_y E u''_{xx})'_{xx} + (k_0 J_y u''_{xxt})'_{xx} - (N u'_x)'_x = f, \quad (1)$$

где штрих означает частную производную, а соответствующий индекс снизу — переменную, по которой берется производная; ρ_0 — усредненная плотность материала (кремния); $F = ab$ — площадь поперечного сечения струны, a , b — большая и меньшая стороны сечения, параллельные осям OY, OZ, соответственно; u — поперечное смещение срединной линии струны; $J_y = ab^3/12$ — момент инерции прямоугольного сечения на поворот относительно оси OY; E — модуль упругости на растяжение (модуль Юнга); N — осевая сила, симметрично действующая на концах струны; k_0 — усредненный коэффициент внутреннего трения (вязкости) материала, определяемый эмпирически. Выражение для плотности силы f будет определено ниже.

Краевые условия двухсторонней жесткой заделки струны для уравнения (1) имеют вид:

$$u(0) = u(l) = 0, \quad u'_x(0) = u'_x(l) = 0,$$

Если плотность силы f имеет специфический, например, нелинейный относительно искомой функции вид, то общее

решение следует искать в приближенном виде, а именно как ряд по собственным функциям $u_j(x)$ и функциям времени [3], зависящим от собственных частот ω_j , т. е.

$$u(x, t) = \sum_{j=0}^{\infty} u_j(x) w_j(t, \omega_j). \quad (2)$$

Функции w_j обусловлены видом функции плотности силы f , которая определяется строением пьезоструктуры и типом автогенератора.

Строение системы возбуждения и преобразования выходного сигнала на основе пьезоструктуры. Для снятия измерительного сигнала и возбуждения колебаний можно использовать элементы, схожие либо отличающиеся как по геометрии, так и по составу. Например, в роли датчика может быть тензорезистор или их группа, выполненная по стандартной полупроводниковой технологии. В качестве актюатора можно применять напыления из ЦТС-керамики. Производство ЦТС-пленок по тонкопленочной технологии основано на использовании многослойной гетероструктуры, состоящей из изолирующего слоя (оксида или силикатного стекла), адгезионных и барьерных слоев и слоя платины, который служит нижним электродом в конденсаторной структуре [7].

Для оценки работоспособности предложенной схемы автогенератора рассмотрим наиболее простой и наглядный случай, когда датчик и актюатор разделены пространственно и представляют однородные прямоугольные ЦТС-пленки в центре струны (рис. 2). Влияние силы пьезоактюатора для однородного (равномерного) распределения вдоль некоторого участка в центре струны выражено в уравнении в виде двух слагаемых следующим соотношением:

$$f = \frac{\partial^2}{\partial x^2} (z_s P(x, t)) + \frac{\partial}{\partial x} \left(P(x, t) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \cong P(t) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Первое слагаемое характеризует поперечную силу, вызванную крутящим моментом $M = z_s P(x, t)$ из-за смещенного положения актюатора относительно нейтральной плоскости струны. В выражении для силы $P(x, t)$ неоднородности напряжения и распределения пьезоматериала на краю актюатора не учитывают, поэтому первое слагаемое можно отбросить, а от второго останется только вторая пространственная производная формы профиля струны. Зависимость $P(t)$ строится по принципу работы электронной части автогенератора, в которую неявно входит интегральная величина (заряд), снимаемая датчиком:

$$q(t) = h_s \int_0^{l_s} e_{31} \epsilon_x dx = h_s z_s \int_0^{l_s} e_{31} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) dx, \quad (4)$$

где h_s — ширина пленки; $e_{31} = d_{31} E_s$ — константа пьезоэлектрического напряжения (заряда), d_{31} — поперечная пьезоэлектрическая константа, E_s — модуль Юнга ЦТС-пленки; l_s — длина пленки; z_s — расстояние от срединной линии струны до середины пленки.

Отметим, что использование классических методик компенсации диссипации энергии нелинейным способом, как в автогенераторе Ван-дер-Поля, невозможно. Из зависимости

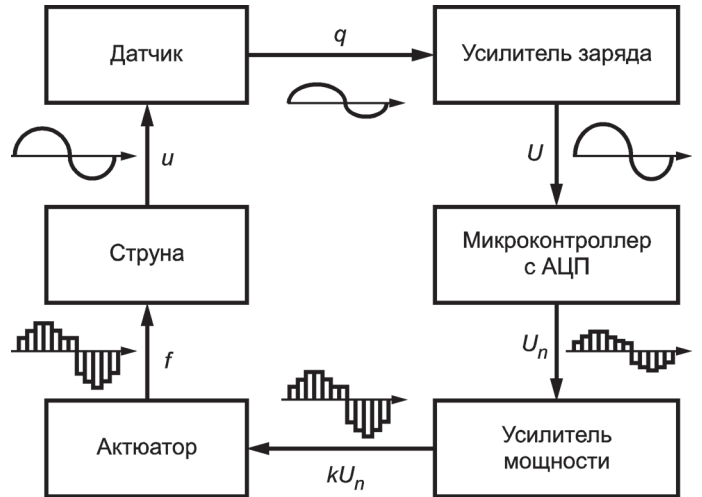


Рис. 2. Функциональная схема измерительной цепи (жирными стрелками показаны механические воздействия (связи), а тонкими — электрические воздействия)

ти (3) можно сделать вывод о параметрическом характере возбуждения колебаний струнного ЧЭ.

Функциональная схема электронной части автогенератора. Цифровой метод обработки измерительного и формирования управляющего сигналов выбран из-за более высокой функциональности и гибкости. Метод позволяет проводить подстройку и перенастройку электронной схемы датчика, что предполагает естественную интеграцию в среду интеллектуальных датчиков.

Функциональная схема автогенератора имеет классическое построение с помощью обратной связи, реализуемой микроконтроллером (см. рис. 2). Заряд q , измеряемый датчиком, преобразуется усилителем заряда в выходное напряжение U прямо пропорционально

$$U(t) = q(t)/C,$$

где C — емкость, определяемая параметрами усилителя заряда.

Запишем уравнение для временной зависимости амплитуды прогиба струны постоянного сечения на основной частоте колебания, т. е. в штатном режиме работы ЧЭ, с обозначениями, как и в уравнении (1):

$$\rho_0 F u_{tt}'' + J_y E u_{xxxx}'''' + k_0 J_y u_{xxxxt}'''' - (N + P(t)) u_{xx}'' = 0. \quad (5)$$

Для определения установившегося режима подставим (2) в (4), затем умножим на $u_0(x)$ и интегрированием по всей длине струны нивелируем функцию с $j > 0$. В результате получим уравнение для амплитуды струны:

$$\ddot{w} + 2\delta \dot{w} + \omega_0^2 \left[1 - \gamma \left(g(t)/\omega_0^2 \right) \right] w = 0, \quad (6)$$

где γ — параметр, характеризующий степень влияния силы $g(t)$ и

$$g(t) = P(t) \int_0^l u_0(x) u_{0,xx}''(x) dx / \left(\rho_0 F \int_0^l u_0^2(x) dx \right).$$

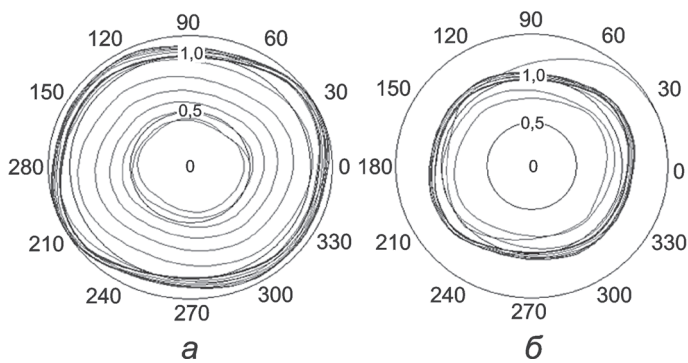


Рис. 3. Фазовая траектория колебательной системы на основе уравнений (6), (7) (по радиальной оси откладываются значения отношения $mw/(CU_{\max})$ с шагом 0,5) при начальном движении из внутренней (а) и внешней (б) областей

Выражение (6) является уравнением линейного осциллятора с диссипацией при параметрическом возбуждении и называется уравнением Хилла—Матье [9].

Условие возникновения простого параметрического резонанса связано с существованием в возбуждающей силе $P(t)$ периодических составляющих, имеющих частоты $\omega = 2\omega_0/n$ ($n = 1, 2, \dots$). Однако при параметрическом резонансе амплитуда возрастает неограниченно. Ограничение можно ввести искусственно с помощью алгоритма, представляющего коррекцию сигнала, подающегося на актюатор. Микроконтроллер управляет коэффициентом усиления (КУ) выходного усилителя мощности так, чтобы для малых значений сигнал усиливался, а для больших уменьшался. Управляющую функцию идеализированно можно представить в виде

$$H(x; \xi) = \theta(\xi - |x|),$$

где $\theta(x)$ — единичная функция Хэвисайда; параметр $\xi > 0$ характеризует значение наибольшего (наименьшего) значения входного сигнала, при котором происходит отключение возбуждения струны.

Возбуждающий сигнал определяется как

$$P(t) = H(q(t)/C; U_{\max}) \cos(\omega t), \quad (7)$$

где $U_{\max}$ — максимальное входное напряжение, определяющее порог отключения выходного сигнала с микроконтроллера или, что аналогично, КУ операционного усилителя становится равным нулю или очень малому значению; заряды на датчике q связаны соотношением (4). Уравнение (6) после подстановки в него выражения (7) преобразуется в классическое уравнение Матье, обладающее всеми свойствами параметрического резонанса, для значений $mw/C \leq U_{\max}$.

Таким образом, параметрический резонанс обеспечивает рост амплитуды колебаний в интервале до $U_{\max}$, а его отсутствие — затухание колебаний, что характеризует уравнение (6) с функцией (7) как параметрический автогенератор. Необходимо отметить, что характер поведения модифицированного уравнения Матье хоть и напоминает классический автогенератор как, например, автогенератор Ван-дер-Поля, но им не является.

В уравнении (6) величина $U_{\max}$ не определяет амплитуду установившихся колебаний, но достаточно близка к ней. Из рис. 3 следует, что фазовая траектория совершает вторич-

ные колебания (флуктуации) около этого критического значения из какой бы области (внешней или внутренней) ни начиналась траектория движения колебательной системы.

Заключение. Проведенный анализ доказывает принципиальную работоспособность предложенной схемы, т. е. существование автоколебательного процесса в предложенной конструкции чувствительного элемента на основе монокристаллического кремния и пьезоструктур с применением ЦТС-керамики, а также функциональной схемы электрической измерительной цепи, обеспечивающей работу разрабатываемой системы в режиме параметрического автогенератора.

Задачами дальнейшего исследования являются учет влияния анизотропии монокристаллического кремния на геометрические размеры струнного ЧЭ и на положение и размеры датчика и актюатора, особенности применения аналогового или цифрового методов обработки сигналов, характер фильтрации измерительного и управляющего сигнала, конкретный вид функций управления и т. д.

Предложенная конструкция параметрического автогенератора — перспективная разработка с широкими возможностями применения [10].

Литература

1. Park J., Washington G., McMickell M. B., Farinholt K. M. Smart material database compilation and material selection tool development // Ind. Com. Appl. Smart Struct. Tech. SPIE. 2010. P. 764501—12.
2. Bandyopadhyay B., Manjunath T. C. Control of vibrations in flexible smart structure using fast output sampling feedback technique // Int. J. Inform. Math. Sci. 2007. N. 3:2. P. 127—141.
3. Эткин Л. Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
4. Давиденков Н. Н. Струнный метод измерения деформаций // Труды физико-технического института. Л.: ГТТИ, 1933.
5. Волков В. С., Баринов И. Н. Полупроводниковые датчики давления на основе резонансного преобразователя // Приборы. 2012. № 7. С. 9—13.
6. Баринов И. Н., Волков В. С., Баринов Н. И. Датчики давления на основе резонансного преобразователя с повышенной временной стабильностью метрологических и эксплуатационных характеристик // Датчики и системы. 2012. № 10. С. 6—9.
7. Вишневский А. С., Воротилов К. А., Жигалина О. М., Ланцев А. Н., Подгорный Ю. В., Серегин Д. С. Исследование влияния структуры нижнего электрода на свойства пленок ЦТС, сформированных методом химического осаждения из растворов // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 1. С. 15—20.
8. Dosch J. J., Leo D. J., Inman D. J. Modeling and control for vibration suppression of a flexible smart structures // Dynamics and control of structures in space II. 1993. P. 603—618.
9. Челомей В. Н. Вибрация в технике: Справочник. Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В. В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978.
10. Пат. 2010122612/28 РФ. Резонансный преобразователь давления / И. И. Баринов, И. Н. Баринов // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 32.

Дата принятия 21.11.2014 г.