

Д. т. н. Р. И. БАЙЦАР, В. С. РАК

Украина, г. Львов

Дата поступления в редакцию
08.09 1997 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. П. ОВСЯННИКОВ

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ВИБРАЦИОННО-ЧАСТОТНЫХ СЕНСОРОВ

Показана возможность использования упругих колебаний полупроводниковых монокристаллических струн из нитевидных кристаллов для создания измерительных преобразователей.

The use possibility of elastic vibrations of semiconductor monocrystal strings that have been made from filamentary crystals for creation of transducers was showed.

Большой интерес к струнным преобразователям обусловлен целым рядом достоинств: принципиально достижимой высокой точностью, помехоустойчивостью, простотой схемы коммутирования частотно-модулированных сигналов, простотой и точностью преобразования сигналов в цифровую форму. Достоинством струнных преобразователей является также высокая чувствительность, стабильность и надежность в работе. Однако реализовать эти достоинства в преобразователях на базе металлических струн не всегда удается.

Новые перспективы в создании вибрационно-частотных сенсоров открываются при использовании в качестве чувствительных элементов электромеханических резонаторов с упругой струной из нитевидного монокристалла (НК) Si и сплава Si-Ge [1, 2].

Полупроводниковые НК, выращенные методом химических транспортных реакций в закрытой системе, обладают совершенством кристаллической структуры и являются бездефектными. Поверхность таких кристаллов сформирована в процессе роста в условиях термодинамического равновесия и обладает минимумом свободной энергии. Вследствие этого упругие свойства НК в сотни раз превышают их свойства объемных кристаллов, а предел прочности их соответствует деформациям в несколько процентов. Совокупность этих качеств позволяет расценивать НК как механическую среду, прочностные и упругие характеристики которой близки к идеальным, и реализовать на их основе колебательную систему с максимально возможной добротностью, стабильностью и надежностью.

Малое значение величины плотности кремния ($2,33 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) позволяет поддерживать колебания при минимальных значениях энергии возбуждения. Прочность на разрыв НК диаметром $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$

достигает величины 10^9 Н/м^2 , что обеспечивает максимальное (из всех известных материалов) значение собственной частоты на единицу длины кристалла.

Упрощение конструкции резонатора и связанное с этим уменьшение габаритов и повышение надежности достигается использованием в качестве колебательного элемента тензочувствительного кристалла. Такой кристалл изменяет свое электросопротивление при деформациях, обусловленных его поперечными колебаниями. При этом деформация НК включает две составляющие: постоянную (равную средней за период) и переменную (гармоническую) —

$$\Delta R = k\varepsilon = -\frac{\pi^2 k A^2}{8l^2} R_0 \cos 2\omega_0 t,$$

где k — коэффициент тензочувствительности;

ε — деформация;

R_0 — начальное сопротивление кристалла;

A — амплитуда основного тона;

l — длина кристалла.

Такое изменение сопротивления кристалла позволяет снимать с него переменный электрический сигнал с амплитудой в десятки милливольт. Это создает исключительные удобства при конструировании резонаторов. Во-первых, отпадает необходимость в использовании приемных элементов для регистрации механических колебаний кристалла, что существенно упрощает конструкцию и повышает надежность. Во-вторых, представляется возможным использовать электростатический способ возбуждения механических колебаний, обладающий рядом преимуществ перед другими известными способами и редко применяющийся именно из-за неудобства съема сигнала.

Конструкции электромеханических резонаторов, выполненных на базе НК, показаны на рис. 1. Одна из них включает вакуумированный баллон 1, в котором размещен держатель 2 с закрепленными на нем концами НК 3 и возбуждающим электродом 4. Другая конструкция резонатора содержит подложку 1 (пластину из ситалла, кварца или керамики), на поверхности которой предварительно формируется вакуумным напылением металлическая пленка 2, которая служит электродом возбуждения. Концы кристалла 3 с токовыводами 4 закрепляются в узлах 5 на пластине. При использовании подложки из полупроводникового материала возбудителем колебаний НК служит сама пластина, на поверхности которой формируется электрический контакт 6.

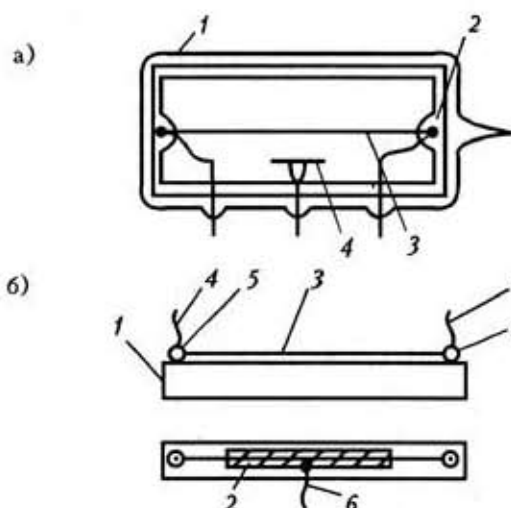


Рис. 1. Конструкции электромеханических резонаторов

При подаче электрического напряжения на резонансной частоте между НК и возбуждающим электродом в кристалле возникают поперечные механические колебания, которые, вследствие тензoeffекта, преобразуются в электрические колебания с частотой, удвоенной по сравнению с частотой механических колебаний [3].

По простоте конструкции такой чувствительный элемент приближается к полупроводниковому тензорезистору, однако имеет более высокие чувствительность к деформации (10^9 Гц на единицу деформации) и добротность ($\geq 10^5$ в вакууме), а также более удобную для регистрации и обработки форму выходного сигнала.

Потенциальные возможности такого чувствительного элемента реализованы в измерительных устройствах, в которых материалам упругих элементов (УЭ) свойственно физико-механическое совершенство. В этом смысле наиболее пригодным материалом для УЭ является сам монокристаллический кремний, который практически не изменяет свойств со временем и при воздействии температуры, обеспечивает наивысшую стабильность и воспроизводимость выходных характеристик сенсоров. Известные способы микромеханической обработки позволяют изготавливать из кремния УЭ необходимой формы и различного функционального назначения. Это позволило достичь практически идеального согласования элементов измерительного узла и создать простые и предельно рациональные конструкции сенсоров.

На рис. 2 приведены конструктивные схемы преобразователя температуры (частотозадающего элемента) — а, силы (ускорения) — б и давления — в.

Особенностью конструкции термопреобразователя (а) является то, что НК 1 закрепляется концами над поверхностью пластины 2 из плавленного кварца, который не влияет на изменение механического состояния кристалла. При изменении температуры это состояние изменяется лишь за счет теплового расширения (сжатия) между фиксированными узлами 3 крепления кристалла. Это приводит к изменению собственной частоты его механических колебаний. Для возбуждения используется металлический электрод 4 в виде пленки.

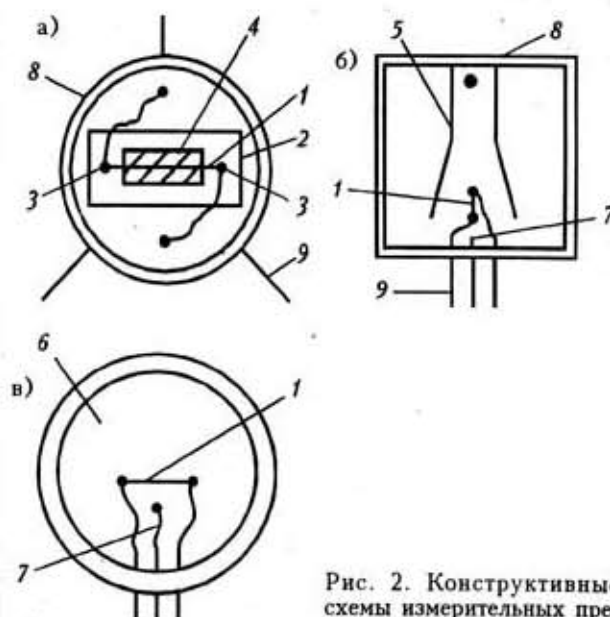


Рис. 2. Конструктивные схемы измерительных преобразователей

При конструировании механических узлов преобразователей силы (б) и давления (в) предпочтение отдавалось монокристаллическим упругим элементам в виде консольной балки 5 и круглой мембраны 6 с буртиком. Чувствительные элементы — кристаллы 1 закреплены в узлах на поверхности УЭ, к которым формируется электрический контакт 7 для возбуждения механических колебаний НК. Преобразующие модули термопреобразователя и преобразователя силы армированы в защитных корпусах 8, содержащих электроводы 9.

Основные направления проводимых нами исследований и разработок по улучшению метрологических характеристик сенсоров:

- оптимизация технологического процесса получения монокристаллических струн с заданными физико-механическими свойствами и высокой степенью поверхностного и объемного совершенства;
- разработка методов посадки и крепления монокристаллических струн с помощью стеклокристаллических цементах на различных типах УЭ;
- исследование способов формирования выходных характеристик сенсоров и создание измерительных схем, обеспечивающих снижение до минимума влияния дестабилизирующих факторов.

Разработанное электронное устройство обеспечивает надежное возбуждение механических колебаний кристалла, преобразование этих колебаний и регистрацию частоты электрического сигнала [4].

На рис. 3 показана структурная схема сенсора, работающего в режиме автоколебаний. При работе сенсора в электронной схеме изменение натяжения кристалла под действием внешней силы (давления) приводит к изменению частоты его колебаний и, соответственно, к изменению частоты переменной составляющей сопротивления. Это изменение частоты автоматически учитывается автоколебательной системой, обеспечивая непрерывность измерения в широком диапазоне изменения входной величины.

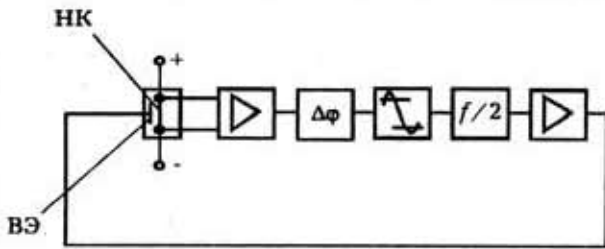


Рис. 3. Структурная схема электронного блока автогенератора

Схема реализуется двумя сигнальными проводниками от токовыводов НК, на которых формируется тензосигнал, и проводником возбуждающего электрода. Предварительным усилителем обеспечивается достаточный для возникновения автоколебаний коэффициент усиления и хорошее соотношение «сигнал – шум». Фазовращатель обеспечивает выполнение условий баланса фаз при возбуждении автоколебаний. Усилитель-ограничитель формирует импульсы для работы триггера-делителя, который согласовывает частоту выхода с частотой входа (частотой механических колебаний). Усилитель мощности выполняет необходимое усиление сигнала напряжения (баланс амплитуд) для возбуждения схемы.

Такая замкнутая структура характеризуется быстрым действием, надежностью и стабильностью в работе.

В результате предварительных исследований установлены условия, характеризующие механическое состояние кристалла в зависимости от тока и напряжения возбуждения.

Величина рабочего тока должна вызывать такое механическое напряжение НК, при котором нагрев, вызванный электрическим током, не оказывал бы заметного сжатия НК. С другой стороны, величина тока должна быть достаточной для получения необходимого значения тензосигнала при колебании кристалла. Для монокристаллического резонатора характерны два режима работы.

При малых значениях тока с увеличением напряжения возбуждения частота собственных колебаний кристалла растет, что объясняется возрастанием величины эффективного растяжения кристалла. Такому состоянию НК соответствует спад частоты при увеличении тока.

При больших значениях тока с увеличением напряжения возбуждения частота колебаний кристалла уменьшается за счет действия двух сил различного направления – тепловой силы сжатия и силы его эффективного растяжения, которые частично компенсируются. С увеличением тока частота колебаний возрастает за счет механического напряжения, вызванного действием силы сжатия.

Работа кристалла в режиме растяжения обеспечивается при величине тока кристалла $I_{нк} = 1...5$ мА и напряжении возбуждения $U_n = 15...30$ В. Режиму сжатия соответствует $I_{нк} > 5$ мА и те же напряжения возбуждения. Установленные закономерности имеют важное значение при выборе режима работы кристалла. Градуировочные характеристики сенсоров показаны на рис. 4. Характеристика преобразователя силы (а) соответствует работе кристалла при растяжении, а преобразователя давления (б) – при растяжении (1) и при сжатии (2) кристалла.

При анализе выходных характеристик сенсоров выявлено, что их прямой и обратный ход имеют идентичный характер, поскольку они отличаются друг от друга не более чем на величину ошибки

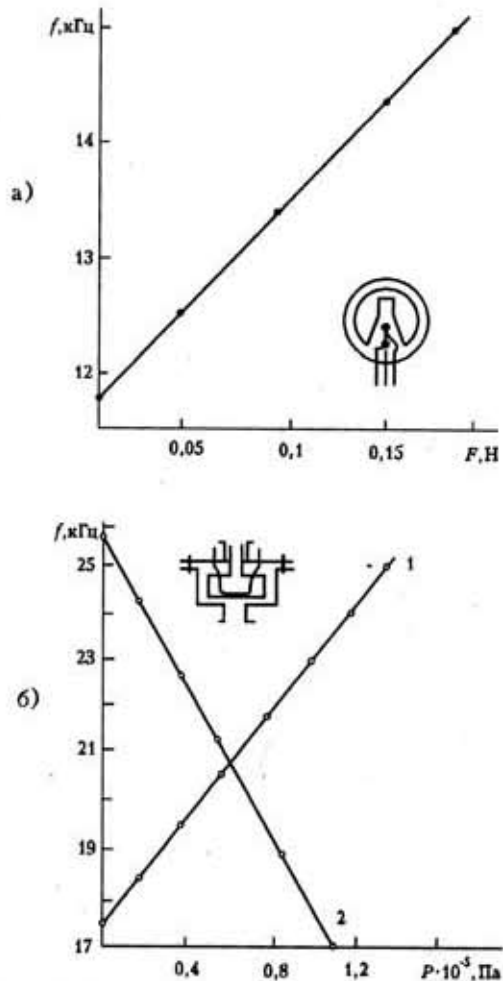


Рис. 4. Градуировочные характеристики преобразователей силы (а) и давления (б):

1 – растяжение НК; 2 – сжатие НК

измерения ± 1 Гц, что свидетельствует об отсутствии гистерезисных явлений.

Разработанные сенсоры применены в системах измерения воздушных сигналов и регистрации гидроразлических параметров океана.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Байцар Р. І. Сучасний стан і перспективи розвитку резонансних сенсорів // Матеріали наук.-техн. конф. з міжнар. участю «Приладобудування – 96». – Вінниця : ВДТУ, 1996. – С. 59.
2. Байцар Р. И., Варшава С. С., Красноженов Е. П., Островская А. С. Электромеханические, терморезистивные и фотоэлектрические преобразователи на основе монокристаллов Si-Ge // Изв. РАН. Неорг. материалы. – 1996. – Т. 32, № 7. – С. 789–793.
3. Bogdanova N., Baitsar R., Voronin V., Krasnojenov E. Semiconductor string pressure sensor // Sensors and actuators. – 1993. – Vol. A. 39, N 2. – P. 125–128.
4. Байцар Р. І., Красноженов Е. П., Рак В. С. Аналіз роботи електронної схеми напівпровідникового стрункового термометророзв'язача // Виміррювальна техніка та метрологія. – 1995. – № 51. – С. 40–43.