



# Beynəlxalq Konfrans "Fizika-2005" International Conference "Fizika-2005" Международная Конференция "Fizika-2005"

7 - 9  
Iyun  
June 2005  
Июнь

səhifə  
№215 page 817-821  
стр.

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

## РАДИАЦИОННОСТОЙКИЕ СТРУННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ $Ge_{1-x}Si_x$ .

АББАСОВ Ш.М., БАЙЦАР Р.И.\*., АГАВЕРДИЕВА Г.Т.,  
КЕРИМОВА Т.И., МИКАЙЛОВА А.Дж.

*Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана  
Аз1143 гор. Баку. пр. Г.Джавида 31<sup>а</sup>*

*Национальный Университет «Львовский Политехник»  
Украина 790113 гор. Львов ул. С. Бендеры 12*

Целью наших усилий является конструирование датчика, сочетающего преимущества разных датчиков и возможности микроэлектронной технологии, а также свойства колеблющейся струны и диафрагмы напряжения. Принципы датчиков напряжения с колеблющейся струной [1] разрабатываются в дальнейшем для преодоления трудностей, обусловленных конструкцией этих датчиков. Разработка микроэлектроники и микросогласованности делает возможным реализовать датчики давления на основе  $Ge_{1-x}Si_x$  струны. Приводятся примеры использования такого класса преобразователей в конкретных конструкциях устройств для измерения различных физических параметров.

Полученные из газовой фазы нитивитные монокристаллы  $Ge_{1-x}Si_x$  обладают высокой степенью структурного совершенства и большой механической прочностью. Нитевидных кристаллов  $Ge_{1-x}Si_x$  ( $x=0,0\div 0,15$ ) наблюдается линейная зависимость изменения сопротивления от деформации растяжения и сжатия. Точки нагружения и разгрузки лежат на одной прямой, что свидетельствует об отсутствии гистерезиса. Кроме того, у кристаллов величина относительного изменения образца одинакова, как при деформации растяжения, так и при деформации сжатия. Характерной особенностью испытываемых кристаллов  $Ge_{1-x}Si_x$  является большой коэффициент тензочувствительности  $K=100\div 140$ , что в  $50\div 70$  раз превосходит проволоочные тензодатчики.

По этому для тензодатчиков наиболее широко применяются германий, кремний и их твердые растворы. Последний обладает высокой тензочувствительностью, химически инертен, может быть получен механически прочным, выдерживает нагрев до  $640^{\circ}C$ , позволяет изготавливать тензодатчики различной формы.

По сравнению со всеми другими типами электромеханических резонаторов, используемых

для механических измерений, струнные датчики обладают высочайшей чувствительностью. Наилучшие результаты были получены с диафрагмой, изготовленной из одного и того же материала. В отношении пьезосопротивляемых свойств  $Ge_{1-x}Si_x$  является наилучшим материалом для этой цели. Используя преимущества микроэлектронной технологии, был разработан новый тип электромеханического резонатора с электростатическим возбуждением. Его конструкция показана на рис. 1. Резонатор изготовлен из нитевидного микрокристалла (струны) 1с зажимами 2 для тока.

Он прочно устанавливается на упругий элемент 3 (в данном случае кремниевая диафрагма).

Поверхность диафрагмы используется также как возбуждающий электрод. По этой причине электрический контакт 4 присоединяется к диафрагме. Функцию этого датчика можно описать следующим образом:

При приложении переменного сигнала между нитями монокристалла и возбуждающим электродом появляется электростатическая сила  $F$  индукции:

$$U = U_0 \sin \omega z$$

$$F = 1/2 \frac{dc}{dz} u_0^2 \sin^2 \omega t \quad (1)$$

где:  $C$  — емкость струна-диафрагма,  $Z$  — расстояние между струной и диафрагмой, равное высоте, на которой струна закрепляется над диафрагмой. Гармоническая возбуждающая сила создает гармонические колебания струны с величиной. Эти колебания вызывают деформацию монокристалла струны.

$$\varepsilon = \frac{\pi^2 A^2}{8\ell^2} (1 - \cos 2\omega t) \quad (2)$$

где:  $\ell$  — колеблющаяся длина кристалла.

В результате пьезосопротивляемого действия переменной компонент деформации вызывает образование переменной компонента струны.

$$\Delta R = k\varepsilon = \frac{\pi^2 k A^2}{8\ell^2} R_0 \cos 2\omega t \quad (3)$$

где:  $K$  — коэффициент тензочувствительности,  $R_0$  — номинальное сопротивление струны.

Если через нитевидного монокристалла проходит постоянный ток, то по струне возникает переменное напряжение. Его частота равна удвоенной частоте механического колебания. Частота колебания вычисляется по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi\ell^2} \sqrt{\frac{BE_c (d_c / 4)^2 + B'\sigma_c \ell^2}{\rho}} \quad (4)$$

где:  $B$  и  $B'$  — числовые коэффициенты зависимости от деформации;  $d_c$  — диаметр струны;  $E_c$  — модуль упругости по длине струны;  $\rho$  — плотность кристалла;  $\sigma_c$  — напряжение, действующее на струну.

Для датчика с диафрагмой круглой формы выражение следующее:

$$\sigma_c = \frac{3\rho(1-\mu)^2 E_c (z+h/2)}{16E_m h^3} (D^2 - \ell^2) \quad (5)$$

где:  $P$  — давление, действующее на диафрагму;  $\mu$  — коэффициент Пуассона,  $D$  — диаметр диафрагмы;  $h$  — толщина диафрагмы,  $E_m$  — модуль упругости диафрагмы.

Уравнение (5) действительно, когда изгиб диафрагмы значительно меньше толщина диафрагмы. Упругие свойства струны на основе  $Ge_{1-x}Si_x$  в сто раз лучше, чем  $Ge$  и  $Si$ .

Колебания можно поддерживать с относительно низкой энергией возбуждения как результата низкой плотности кремния. Сопротивление разрушению у кристалла струны относительно высокое. Это

обеспечивает максимальное значение частоты механического колебания для длины одного кристалла. Чувствительность деформации кристалла относительно высокая.

Полученная чувствительность (выходная частота в функции приложенного давления) находится в хорошем соответствии с обсуждаемой теорией и зависит от длины струны. Исследования показывают, что датчик термостабилен.

В настоящее время весьма высокие требования предъявляются к точности средств измерения и контроля, применяемых для исследования различных физических характеристик изучаемых объектов. Практическая реализация данных требований возможна лишь в случае применения информационно-вычислительных комплексов, построенных на основе частотных датчиков. Разработка и создание соответствующих датчиков возможна при использовании в качестве чувствительных элементов струн с физикомеханическими свойствами, близкими к идеальным, и прямом преобразовании механических колебаний струн в электрический сигнал.

Идеальной механической средой является структурно совершенный монокристалл, обладающий способностью изменять свои электрические свойства при изменении механического состояния. Нами было предложено использовать в качестве струны нитевидные монокристаллы сплавов  $Ge-Si$  [1-4], которые обладают высокой механической прочностью и упругостью, значительно превышающими значения этих параметров для объемных монокристаллов. При растяжении монокристаллической струны динамический диапазон изменения частоты ее упругих колебаний практически соответствует области упругой деформации материала и, следовательно, ограничен пределом механической прочности.

При определенных условиях выращивания и легирования можно получить любые размеры кристаллов от субмикронных до сотен микрон в диаметре и длиной до нескольких сантиметров с требуемыми электрофизическими свойствами.

Критерием достижения наивысшей чувствительности ( $>10^0$  Гц) отн.ед. деформации струнного преобразователя к измеряемой величине, является возможность использования предельно коротких и тонких кристаллов. Наличие у этих кристаллов тензоэффекта (коэффициент тензочувствительности  $K>150$ ) позволяет осуществить в них прямое преобразование механических колебаний в колебания электрического тока или напряжения. Для возбуждения собственных механических колебаний кристаллов использован электрический метод, который имеет ряд преимуществ перед другими известными способами. Физические основы работы полупроводникового струнного тензообразователя описаны в [4,5].

В отличие от других струнных преобразователей, используемых в настоящее время, струнные

монокристаллические тензопреобразователи позволяют обеспечить более высокую чувствительность и точность измерения при минимальных внешних габаритах и потребляемой мощности.

Поведение сопротивления полупроводниковых тензодатчиков можно выразить следующей функциональной зависимостью

$$R_D = f(T; \epsilon; R_{g_0}; \rho_0)$$

где:  $R_D$  - сопротивление датчика  $T$  - абсолютная температура Кельвина;  $\epsilon$  - уровень деформации;  $R_{g_0}$  - сопротивление ненапряженного датчика;  $\rho_0$  - удельное сопротивление.

Простейшим способом изменения механического напряжения в кристалле является непосредственно его соединение с деформируемым вследствие внешнего воздействия упругим элементом (УЭ).

Деформация УЭ приводит к изменению собственной частоты колебаний кристалла. По отношению к тензопреобразователю УЭ выполняет функцию элемента для возбуждения собственных механических колебаний в кристалле, т.е. УЭ служит одновременно для передачи механических напряжений кристаллу и для возбуждения в нем колебаний. Отпадает необходимость в устройстве, преобразующем механические колебания кристалла в электрический сигнал.

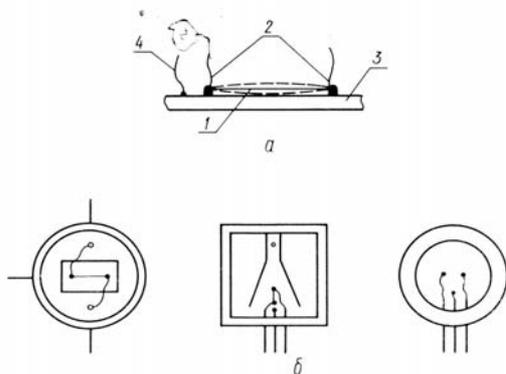


Рис.1. Схемы виброчастотного тензопреобразователя на монокристаллической пластине, балке и мембране: а) принципиальная; б) конструктивные; 1 – тензочувствительный НК  $Ge_{1-x}Si_x$  ( $x=0,05$ ); 2 – токовыводы; 3 – упругий элемент; 4 – электрический контакт.

Такое преобразование происходит непосредственно в самом кристалле за счет его внутренних свойств. Таким образом, удастся реализовать конструкцию преобразователя, соответствующую конструкциям простейших тензорезисторных датчиков, но превосходящего их по чувствительности на 2-3 порядка.

На рис.2 показана схема датчика давления, который содержит монокристаллическую

кремниевую мембрану и струнный тензопреобразователь из нитевидного монокристалла Ge-Si. Использование приема, когда положение кристалла на мембране при ее деформации давлением соответствует свободному (ненапрянутому) состоянию, позволило получить максимальную чувствительность при измерении пульсации давления. Датчики абсолютного давления и разности давлений такого типа могут использоваться в автоматизированных системах жизнеобеспечения [6,7].

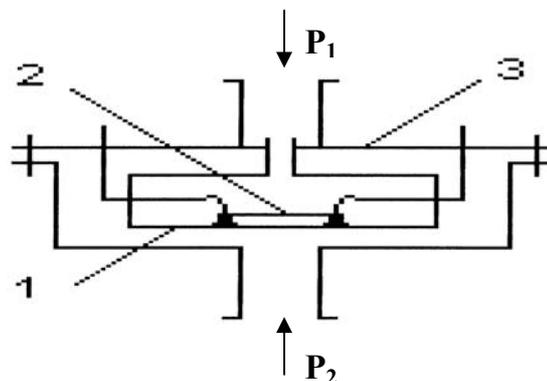


Рис. 2. Схема конструкции датчика давления: 1-мембранно-преобразующий узел; 2-резонатор; 3- корпус с патрубками

Конструкция датчика давления на основе НК  $Ge_{1-x}Si_x$  представлена на рис.2 Чувствительные элемент установлен в герметически запаянной упаковке. Внутренний объем упаковки соединен с окружающим пространством с давлением  $P_1$  с помощью капиллярной трубки.

Вторая капиллярная трубка соединяет другую сторону датчика к измеряемому давлению  $P_2$ .

Если первая трубка закрыта, то для измерений абсолютного давления можно использовать модули герметически запаянной диафрагмы. Относительные изменения давления можно измерить, когда диафрагма не герметически запаяна.

Когда разница между  $P_1$  и  $P_2$  изменяется, появляется деформация диафрагмы. Эта деформация преобразовывается в колебания частоты выходного сигнала. Сигнал датчика передается на межфазную цепь. Это принуждает модуль датчика работать в постоянном режиме самоколебаний. Конструкция и размеры датчика зависят от его практического применения. Теоретические исследования и эксперименты показывают, что геометрические размеры струны и диафрагмы оказывают значительное влияние на эксплуатационную характеристику датчика. Как обсуждалось выше, собственная частота колебания монокристаллического резонатора зависит от размеров диафрагмы.

Чувствительный элемент виброчастотного тензопреобразователя (ВТП) представляет собой электромеханический резонатор струнного типа с

электростатическим возбуждением поперечных механических колебаний. Струна выполнена из тензочувствительного нитевидного монокристалла  $n\text{-Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ , длина 1-5 мм, диаметр 8-12 мкм с токовыводами и жестко закреплена концами на пластине или деформируемой поверхности (в упругом элементе) на расстоянии 50 мкм от нее. При увеличении атомного процента Si в  $n\text{-Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  увеличивается тензочувствительность датчика.

Миниатюрные полупроводниковые датчики температуры на основе нитевидных кристаллов  $n\text{-Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  ( $x=0,05$ ) предназначены для локального измерения температуры в труднодоступных местах различных устройств. В качестве чувствительных элементов использованы терморезисторы из НК  $n\text{-Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  ( $x=0,05$ ) диаметром 20 мкм и длиной 1 мм с проволочными контактными микровыводами.

Использование терморезисторов из полупроводниковых нитевидных монокристаллов длиной 1 мм и диаметром 15-20 мкм позволяет устранить недостатки преобразователей с проволочными термочувствительными элементами:

- уменьшить геометрические размеры и массу конструкций, тем самым, снизить механическую и тепловую инерционность;
- повысить чувствительность и разрешающую способность за счет более высокого значения температурного коэффициента сопротивления кристаллов ( $\alpha=1,5\text{-}6\%$  град $^{-1}$ );
- уменьшить искажение теплового поля нагревателя при перемещении кристалла и, тем самым, снизить погрешность преобразователя;
- расширить функциональные возможности преобразователя за счет обеспечения необходимой зависимости изменения сопротивления кристаллов от температуры (линейной, степенной, экспоненциальной).

Сущность предложенного способа преобразования перемещения (либо другой механической величины, которая может быть приведена к перемещению) в электрический сигнал заключается в возможности локального измерения температуры с помощью миниатюрного датчика.

Применительно к задаче измерения температуры может быть использован струнный датчик, особенностью конструкции которого является то, что подложка, на которой закреплен в узлах кристалл, выполнена из материала с низким коэффициентом линейного расширения (например, кварц). Схема термометра показана на рис.4. Использование кварцевой подложки снижает инерционность изолированной струны (порядка 0,1-0,3 с). Диапазон измеряемых температур,  $-50^{\circ}\text{C}\div 200^{\circ}\text{C}$ , при  $20^{\circ}\text{C}$  сопротивление  $0,5\div 1,0$  ком, чувствительность 500 мкВ/град. Такие струнные термометры могут найти применение для измерения температуры окружающей среды.

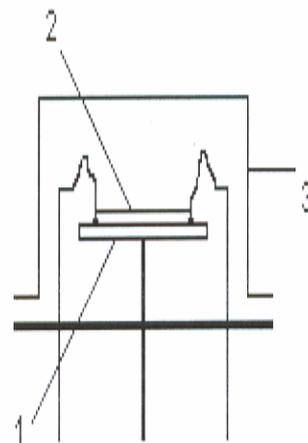


Рис.3. Схема конструкции датчика температуры; 1 – кварцевая подложка; 2 – резонатор; 3 – защитный корпус

Градуировочные характеристики виброчастотных тензопреобразователей, силы, давления, температуры и др. представлена на рис 4.

Высокая чувствительность струнных датчиков к давлению, превышающему 100 Гц/мм вод.ст., позволяет применять их в устройствах для измерения концентрации газа. В основу их работы положено сочетание оптического и деформационного методов измерения. Изменения давления происходят из-за того, что молекулы газа, поглощая кванты падающего света, приходят в возбужденное состояние, а затем энергия возбуждения их колебательно-вращательных степеней свободы переходит в энергию поступательного движения молекул, т.е. в тепло, соответствующее повышению давления.

Схема конструкции приемной части газоанализатора рис.5 на базе монокристаллической мембраны на два симметричных объема, которые заполняются эталонным газом. Окна выполнены из прозрачного для инфракрасного света стекла. Благодаря симметрии устройства повышена чувствительность в сравнении с существующими устройствами [8]. Температурная компенсация обеспечивается дифференциальной схемой работы тензопреобразователей.

Благодаря использованию универсального тензомодуля с  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  тензорезисторами разработаны миниатюрные чувствительные высокочастотные датчики для измерения давления жидкостей и газов в диапазонах от  $0\div 4\cdot 10^4$  Па до  $0\div 30$  МПа. Каждый датчик давления снабжен усилителем, что повышает его разрешающую способность, и устройством согласования с регистрирующей аппаратурой. Такое решение позволяет создать ряд датчиков с унифицированным выходным сигналом.

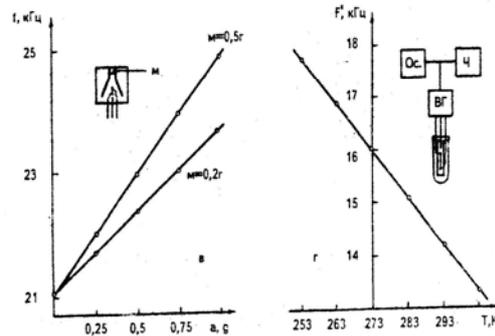
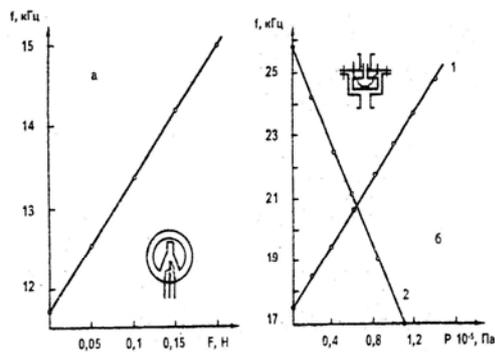


Рис. 4. Градировочный характеристики виброчастотный тензопреобразователей (ВТП) силы(а),давления(б),температуры(г)

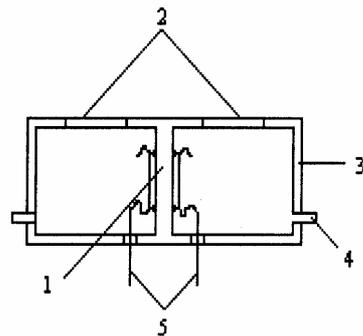


Рис.5. Схема конструкции приемной части газоанализатора: 1 – мембрана с закрепленными резонаторами; 2 – окна; 3 – корпус; 4 – разделенный мембраной на два симметричных объема; 5 – термовыводы.

Установлено повышение стойкости к облучению электронами и  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  образцов НК  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  с увеличением содержания кремния в них по сравнению с образцами кремния или германия.

Облучение осуществлялось 77К и при комнатной температуре электронами с энергией 4,5 МэВ и  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ .

Области их применения – авиационная и космическая техника, робототехника, медицина и др.

- [1]. Милохин Н. Частотные датчики для система управления. Энергия, Москва. 1978, 130с.
- [2]. Байцар Р.И., Варшава С.С, Красножонов Е.П., Островская А.С., Изв. РАН. Неограниченные материалы 1996. т.32. с.789-793.
- [3]. Аббасов Ш.М., Агавердийева Г.Т., Байцар Р.И. Докл. VIII кор. совещ. по исслед. и применению сплавов германий-кремний. г. Ташкент, ноябрь, «ФАН» 1991г. с.79-80.
- [4]. Аббасов Ш.М., Байцар Р.И., Аббасов Ш.И., Красножонов Е.П. Изв. НАН Азерб. Республик. Баку. Изд. «Эльм» 2000. т.20. №5. с.45-48.
- [5]. Ахременко Ю.Г., Байцар Р.И., Красножонов Е.П., «Физическая электроника». Респ. Межвед. Научно-техн.сбор.Вып.31.1985.с.32.
- [6]. Керимов М.К., Аббасов Ш.М., Аббасов Ш.И. «Физика». Баку.»Эльм». 2002.т.8.№1. с.3-5.
- [7]. Аббасов Ш.М. Влияние облучения на электрофизические, оптические и фотоэлектрические свойства твердых растворов германий-кремний. «Эльм», Баку, 2003.208 с.
- [8]. Красножонов Е.П., Байцар Р.И., Родионов А.В. Тез.Докл. Всесоюзн. школы по тех. сред. и методам исслед. мирового океана. Москва, 1991, 2, с.36.