

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 531.781.2.087; 620.017.08

### КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДАТЧИКОВ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ВНУТРИ СРЕД

С.В. ЛЕСКОВЕЦ

(Полоцкий государственный университет)

*Предложены новые конструкции полупроводниковых датчиков для измерения внутренних касательных напряжений, включающих селективный измеритель компонент касательных напряжений, соединенный с преобразователем и анкерными устройствами, фиксирующими его в среде. В разработанных конструкциях измерителей напряжений используется сдвиговой пьезорезистивный эффект. Предложены конструкции измерителей касательных напряжений с действительным и мнимым интегрированием. Для исключения влияния нормальных механических напряжений предложено использовать стабилизатор электрического напряжения в цепи питания преобразователя. Разработанные конструкции датчиков касательных напряжений наиболее полно соответствуют требованиям к измерительным устройствам для преобразования распределенных векторных величин – внутренних механических напряжений – в выходной сигнал.*

**Введение.** Механические напряжения в среде являются векторной распределенной энергетической характеристикой состояния среды. Для их измерения внутри среды датчик должен выполнять функцию проводника механических напряжений, заместив собой определенный объем среды.

Конструкция такого датчика состоит из отдельных, взаимосвязанных в единую структурную схему элементов. К таким элементам относятся детали датчика, участвующие непосредственно в измерении механического напряжения: преобразователь с суммирующим блоком при действительной интеграции, упругий элемент, устройство ввода напряжений в упругий элемент, селектор напряжений, корпус датчика. Детальными, не участвующими непосредственно в измерении напряжений, являются герметизирующие и защищающие от влияния внешней среды элементы корпуса, соединительные провода. Обычно в конструкции датчика все элементы частично или полностью объединены между собой. Преобразователь и упругий элемент совместно образуют измеритель напряжений с функциями селекции и суммирования; элементы корпуса являются элементами распределения и ввода напряжений. Совместно все элементы взаимодействуют между собой, обеспечивая получение на выходе датчика сигнала, действующего в среде:  $V = f(\bar{\sigma}_\mu)^{1/3}$ , где  $(\bar{\sigma}_\mu)^{1/3}$  – величина измеряемого напряжения. Сигнал, получаемый от любой конструкции датчика внутренних механических напряжений, является функцией средней интегральной величины:

$$(\bar{\sigma}_\mu)^{1/3} = \frac{\int \sigma'_i dS}{S},$$

где  $\sigma'_i$  – значение измеряемого напряжения по площадке  $-dS$ .

От геометрической формы датчика и соотношения модулей упругости материала датчика и среды зависит величина концентрации напряжений по контактной поверхности корпус датчика – среда. Величина напряжений по этой зоне определяет значение напряжений, измеряемых датчиком. Датчик не искажал бы значений напряжений в среде, если бы его продольные и поперечные деформации во время деформирования среды соответствовали деформациям среды. Известно, что основной областью применения датчиков напряжений являются конструкции из материалов, обладающих вязкоупругопластическими свойствами. Создать конструкцию датчика с деформативными свойствами, соответствующими свойствам среды, затруднительно. Упругодеформативные свойства датчика определяют упругую обратную реакцию на среду и распределение напряжений в ней в зоне расположения датчика. Для не допущения «разгрузки среды» и снижения величины напряжений рекомендуется использовать жесткую конструкцию датчика в направлении измеряемых компонент тензора напряжений [1, 2]. Это создает в среде в зоне расположения датчика увеличенное значение величины напряжений, превышающее реальные значения напряжений в среде при отсутствии датчика.

Для датчиков механических напряжений важно, чтобы кратность увеличения напряжений в среде оставалась постоянной в пределах изменения физико-механических свойств среды в процессе её дефор-

мирования. Эти условия обеспечивает жесткая конструкция датчика с минимальным значением размера датчика в направлении измеряемых напряжений. Вопрос об идеальной форме датчика нормальных напряжений решается в форме пленочной структуры. Такая структура способна воспринимать только нормальные напряжения сжатия, что обычно и требуется во многих задачах.

Перед установкой в среду, где проводится измерение напряжений, датчик подвергается исследованиям в модели среды при известных значениях величин измеряемых и неизмеримых компонент тензора напряжений, изменении деформативных свойств среды, влиянии температуры и других факторов [1, 2, 4, 5]. По этим данным строится его градуировочная характеристика.

**Датчики касательных напряжений.** Как известно [1, 2], при рассмотрении особенности взаимодействия разных геометрических форм включений со средой теоретически не удастся решить задачу о форме и упругих характеристиках датчика касательных напряжений, обеспечивающих минимальные искажения величины касательных напряжений при расположении его в среде.

Во многих композиционных материалах для эффективного восприятия касательных напряжений применяется стержневая арматура, волокна, объемная пряжа, работающие в среде на срез или смятие. Известно, что при действии касательных напряжений в среде армирование сечений железобетонных элементов эффективно производится стержневой арматурой, работающей на смятие. Площади поперечного сечения материала среды и арматурных стержней и определяют величину воспринимаемых касательных напряжений и значение обратной упругой реакции.

В работах [3 – 5] экспериментально изучались вопросы влияния сдвиговых напряжений на характеристики датчиков нормальных напряжений. Согласно одному из выводов этих работ, для получения минимальных искажений напряжений в зоне установки датчика в направлении сдвиговых напряжений датчик должен обладать жесткостью, меньшей или равной сдвиговой жесткости замещаемого объема среды.

В работе [6] предлагается датчик в форме гильзы с упругим внутренним консольным элементом, контактирующим им по обрезу гильзы со средой. В [7] описан датчик в виде диска, состоящий из двух пластин, контактирующих со средой и имеющих возможность плоскопараллельного сдвига, которому сопротивляется элемент, скрепляющий эти пластины и работающий на растяжение. Л.Н. Фомица в [1] предлагает схему преобразователя и датчика с жестким полупроводниковым упругочувствительным элементом для измерения нормальных и касательных напряжений. Все вышеперечисленные конструкции датчиков не имеют элементов ввода касательных напряжений в измеритель датчика. Авторы утверждают, что ввод касательных напряжений может быть обеспечен посредством сил трения со средой, клеявыми соединениями корпуса датчика с измерителем.

Закладываемый в среду датчик механических напряжений любой конструкции является элементом последовательной цепи в передаче измеряемых и не измеряемых компонент тензора напряжений в среде. При нарушении этой цепи передачи возникают существенные искажения величины тензора напряжений в среде и величины напряжения, измеряемого датчиком. Обеспечить эффективную передачу всех компонент тензора напряжений в среде и в конструкции датчика на измеритель является трудно-разрешимой задачей. Наиболее полно эту задачу могут решить конструкции датчиков, имеющих форму шара, обзор которых приведен в [4].

В измерительной технике задачи надежного контакта в передаче напряжений в материале (например, при измерении сил [8]) решаются путем устройства элементов ввода измеряемой величины в измеритель.

Для датчиков механических напряжений жесткость и надежность соединений: среда – элемент ввода; элемент ввода – измеритель; измеритель – элемент ввода; элемент ввода – среда, должны быть максимальны. Податливость в этих соединениях недопустима. Внутренние соединения в датчике поддаются контролю при его изготовлении. Обеспечить надежный контакт измерителя со средой можно, только применив элементы ввода в виде симметричных анкерных устройств.

Исходя из физико-механических свойств полупроводниковых материалов и возможных технологий получения селективного измерителя касательных напряжений предлагаются две конструкции датчика касательных напряжений с анкерными элементами ввода. В первой элементами ввода являются концы стержня измерителя, а средняя часть играет роль упругочувствительного элемента (рис. 1).

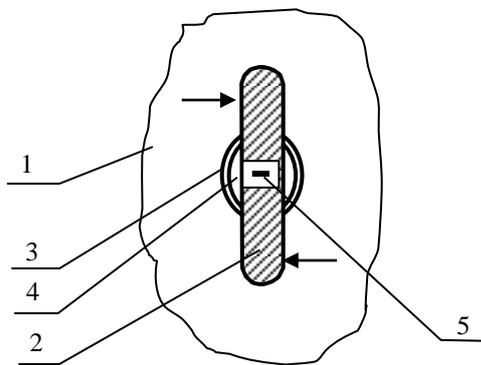


Рис. 1. Схема размещения полупроводникового датчика касательных напряжений в среде:

- 1 – деформируемая среда; 2 – измеритель датчика;
- 3 – защитная оболочка; 4 – полость для защиты зоны преобразователя; 5 – зона преобразователя

Элементы ввода являются упругой частью общего концентратора измеряемых напряжений с пассивной функцией распределения.

Аргументами в пользу формы датчика касательных напряжений в виде стержня являются:

- 1) упругий стержневой элемент, имея определенную длину, будет пересекать сечение среды, в котором определяется значение касательных напряжений, и участвовать в передаче этих напряжений;
- 2) упругий элемент в виде стержня из полупроводникового материала имеет более высокий модуль сдвига, чем заменяемое им эквивалентное сечение среды (табл. 1), и является для неё концентратором касательных напряжений;
- 3) на стержневой конструкции из полупроводникового материала можно выполнить селективный измерительный преобразователь касательных напряжений с минимальной измерительной базой в любом месте сечения стержня;
- 4) концы стержня по обе стороны от измерительного преобразователя будут являться анкерами в среде, надежно передающей касательные напряжения от среды на преобразователь, а в цепи передачи напряжений отсутствуют соединения;
- 5) на стержне из полупроводникового материала можно выполнить симметричную конструкцию элементов ввода напряжений в преобразователь;
- 6) в разных местах поперечного сечения стержня из полупроводникового материала имеется возможность выполнить несколько миниатюрных измерительных преобразователей, что позволит создать датчик для измерения градиента касательных напряжений;
- 7) стержневой упругий элемент из полупроводникового материала и преобразователь представляют единый тензомодуль для измерения касательных напряжений (совмещенный упругочувствительный элемент), в котором отсутствуют явления ползучести и гистерезиса, связанные с соединением преобразователя с упругим элементом;
- 8) можно выполнить измеритель касательных напряжений с мнимым интегрированием путем устройства совершенного пленочного преобразователя на поверхности упругого элемента в виде диффузионной или эпитаксиальной тензочувствительной структуры. Площадь поперечного сечения датчика и длина преобразователя по оси стержня определяет интегрирующую способность датчика.

Таблица 1

Модули упругости –  $E$ , сдвига –  $G$ , коэффициенты Пуассона –  $\mu$   
для материалов преобразователя и измерительных сред [9 – 12]

Материал	$E$ , МПа	$G$ , МПа	$\mu$ , отн. ед.
Si{001}	~130 000	~81000	~0,285
Si{011}	~158 000	~52000	~0,07
Si{111}	169 000	67 000	0,262
Ge{001}	~100 000	–	~0,28
Ge{011}	~138 000	–	~0,04
Ge{111}	138 000	55 200	0,249
GaAs	117 600	–	–
Конструкционная сталь	210 000	81 000	0,3
Бетон тяжелый	9 500...40 000	3600...16 000	0,2
Стекло	50 000...70 000	2 200	–
Песчаный грунт	11...50	–	–
Эпоксидный материал	4000	–	–
Резина	5...28	–	0,45
Гетинакс	10 000...17 000	800...2500	–
Текстолит	6 000...10 000	2500	–

Другая предлагаемая конструкция датчика касательных напряжений имеет форму в виде шара. Элементами ввода являются два отдельных составных элемента в виде полусфер, составляющих шар. Полусферы скреплены между собой стержневой конструкцией измерителя. Такая конструкция датчика касательных напряжений с дополнительными элементами ввода позволяет изменять жесткость датчика, обеспечивая оптимальное соотношение жесткость – чувствительность при измерениях в средах с разными значениями диаграмм «напряжения – деформации». Жесткость датчика касательных напряжений можно изменять при стержневой конструкции измерителя путем изменения соотношения площадей в плоскости сдвига, занимаемых в среде элементами ввода и сечения упругого элемента измерителя, а также изменением расстояния между сдвигающимися гранями (базы преобразователя). Пример конструкции такого датчика приведен на рисунке 2.

Симметричные элементы ввода в виде полусфер можно выполнить из материала с высоким модулем упругости – металла, керамики. Для упругого сферического включения известно решение о распределении напряжений в среде [1], и такая форма датчика обеспечивает в среде отсутствие «эффекта ориентации» [5].

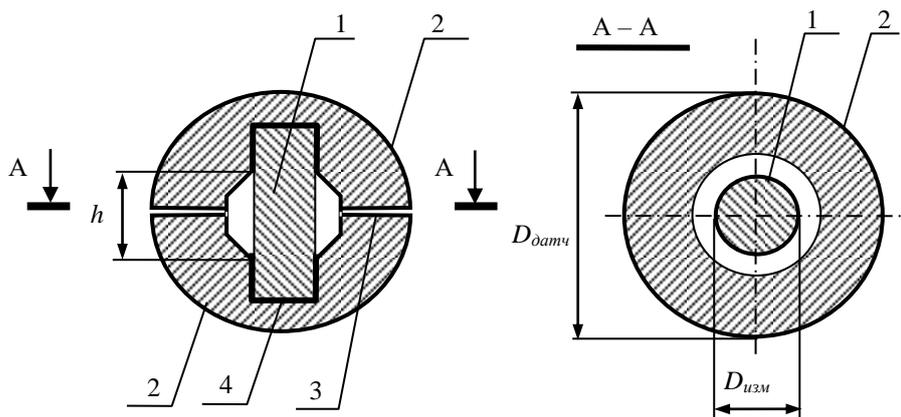


Рис. 2. Конструкции датчика внутренних касательных напряжений с элементами ввода:  
 1 – измеритель напряжений; 2 – элемент ввода напряжений в измеритель;  
 3 – притертая поверхность скольжения; 4 – стеклоприпой

**Конструктивные схемы измерителя.** От конструкции измерителя, встраиваемого в твердотельный датчик, зависит значение выходного сигнала, основные физико-механические и геометрические свойства всего датчика. Измеритель состоит из упругого элемента и преобразователя.

Касательные напряжения приводят к появлению деформаций сдвига в среде. В упругом элементе от контакта со средой тоже возникают сдвиговые напряжения, перпендикулярные оси стержня, и нормальные напряжения вдоль оси.

Материал упругого элемента, воспринимая напряжения от среды, должен работать в области упругих деформаций. Величина напряжений в сечении упругого элемента зависит от соотношения модулей сдвига среды и упругого элемента и расстояния в нем между сдвигающими гранями.

Если принять форму датчика касательных напряжений в виде короткого стержня, то и измеритель датчика будет иметь такую же форму. На измерителе датчика при расположении его в сплошной среде, подверженной действию механических напряжений, возникнет картина напряжений со сложными зависимостями, подчиняющимися законам объёмного контактного взаимодействия двух твердых тел.

В работах [1, 4] приведен обобщенный анализ решения задач контактного взаимодействия, выполненных Ю.Н. Подильчуком, Г.Н. Савиным, Х.Х. Ээсоргом и др.

Известны экспериментальные исследования картины напряжений с включением в фотоупругих моделях среды, проведенные под руководством О.Ю. Соммала [4], с использованием электростатических моделей В.М. Файнбурда [9], выполненных в фотоупругих включениях в среду [10].

Установлено, что нормальные и касательные напряжения по длине включения, особенно в краевых точках, бесконечное число раз меняют знак. Это находит и теоретическое подтверждение, например, в работе [11, с. 225]. Таким образом, если непосредственно на стержне, который по всей длине имеет контакт со средой, выполнить преобразователь, то будут иметь место большие погрешности при измерениях напряжений.

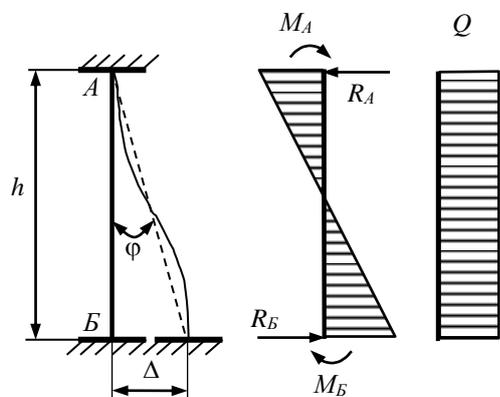


Рис. 3. Расчетная схема измерителя

Обычно в практике размещения преобразователя на упругом элементе используют рекомендации, которые изложены в принципе Сен-Венана [8]. Для получения устойчивых однозначных зависимостей при конструировании измерителей векторных величин с преобразованием их в электрический сигнал необходимо располагать преобразователь на «достаточном» удалении от внешней нагружающей системы. Её особенности при этом затухают.

Предварительные расчеты для стержневой конструкции измерителя можно выполнить по известной расчетной схеме [12, с. 528] (рис. 3).

Площади сечений датчика и измерителя по рисунку 2 соответственно составят:

$$F_{датч} = \frac{\pi D_{дат}^2}{4}; F_{изм} = \frac{\pi D_{изм}^2}{4}.$$

Приведенный модуль сдвига датчика:

$$G_{датч} = \frac{G_{изм} F_{изм}}{F_{датч}}.$$

Если принять величину касательных напряжений, действующих в измерителе датчика  $\sigma_{ij} = \frac{Q}{F_{изм}} = \varphi G_{изм}$ , где  $Q$  – величина поперечной силы, а угол сдвига  $\varphi = \frac{\Delta}{h}$  при малых перемещениях, то модуль сдвига для полупроводникового материала измерителя [10]:

$$G_{изм} = \frac{E}{2(1+\mu)};$$

моменты для расчета прочности заделки измерителя в элементах ввода:

$$M_A = M_B = -\frac{6EJ}{h^2} \Delta = -\frac{6EJ}{h} \varphi = \frac{12EJ\sigma_{ij}}{hG_{изм}} = \frac{12J\sigma_{ij}}{h}(1+\mu).$$

Величина поперечных сил, воспринимаемых измерителем, связана со значениями касательных напряжений в нём:

$$Q = R_A = -R_B = \frac{12EJ}{h^3} \Delta = \frac{12EJ}{h^2} \varphi = \frac{12EJ\sigma_{ij}}{h^2 G_{изм}} = \frac{24J\sigma_{ij}}{h^2}(1+\mu).$$

Известно небольшое количество геометрических форм металлических упругих элементов, работающих на сдвиг [8]. Количество таких форм упругочувствительных элементов из монокристаллических полупроводниковых материалов и сапфира весьма ограничено хрупкими свойствами материалов и возможностями существующих технологий обработки поверхности [13]. Наиболее технологичны для таких конструкций простые формы. Для датчика касательных напряжений с полупроводниковым селективным преобразователем конструкция измерителя возможна в виде стержня в нескольких вариантах:

- элемента сплошного или трубчатого сечения, например, из металла к которому присоединен отдельный полупроводниковый преобразователь;
- элемента из полупроводникового материала с системой электроконтактов, выполняющего функции совмещённого упругочувствительного элемента (преобразователя и упругого элемента);
- упругого элемента из полупроводникового материала или сапфира, на поверхности которого выполнены отдельные диффузионные или эпитаксиальные преобразователи.

Первая из конструкций позволяет из металла изготовить упругий элемент любой сложной формы, например, с изменением сечения в зоне расположения преобразователя или с выделением отдельной зоны для него, работающей параллельно с общим упругим элементом. Способ соединения полупроводникового преобразователя к металлическим упругим элементам возможен, например, с использованием стеклоприпоев. Для обеспечения надежности соединения необходим ряд условий, изложенных в [14].

Форма сечения упругого элемента должна быть симметрична для обеспечения одинакового момента сопротивления при сдвиге анкерных частей измерителя в любом направлении. Наиболее приемлема круглая форма стержня или в виде квадрата. Примеры измерителя из полупроводникового материала с функцией совмещённого упругочувствительного элемента для измерения одной компоненты касательных напряжений приведены на рисунке 4.

Размеры  $c'$  и  $b'$  определяют границы соответственно токовых и измерительных электроконтактов преобразователя;  $a$  и  $b$  – сечения преобразователя,  $d$  – заделки в измерительную среду или в элементы ввода; 1, 2, 3 – кристаллографические направления;  $V_3$  – напряжение источника питания;  $V_2 = f(\sigma_{ij})$  – выходное напряжение.

Конструктивно можно выполнить измеритель для измерения двух компонент касательных напряжений (рис. 5).

Кристаллографическая ориентация для получения функциональной зависимости каждого из выходных сигналов от одной соответствующей компоненты касательных напряжений при выполнении его из кремния по направлениям 1, 2, 3 должна соответствовать данным таблицы 2.

Менее предпочтительный вариант конструкции измерителя предусматривает зависимость выходного сигнала от величины двух компонент касательных напряжений, действующих в измерителе. В этом

случае значение каждой из компонент находится из решения системы двух линейных уравнений с двумя неизвестными. Подробно возможные ориентации приведены в [15].

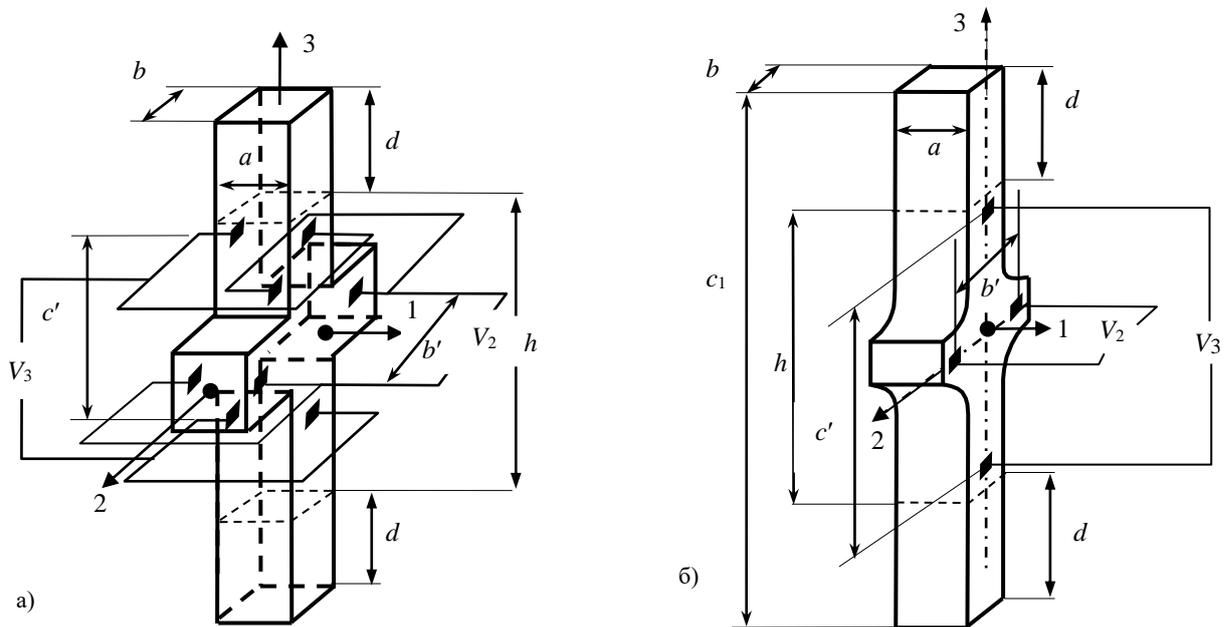


Рис. 4. Объёмный однокомпонентный измеритель касательных напряжений:  
 а – полученный путем резки с двусторонней системой электродов;  
 б – путем травления с односторонней системой электродов

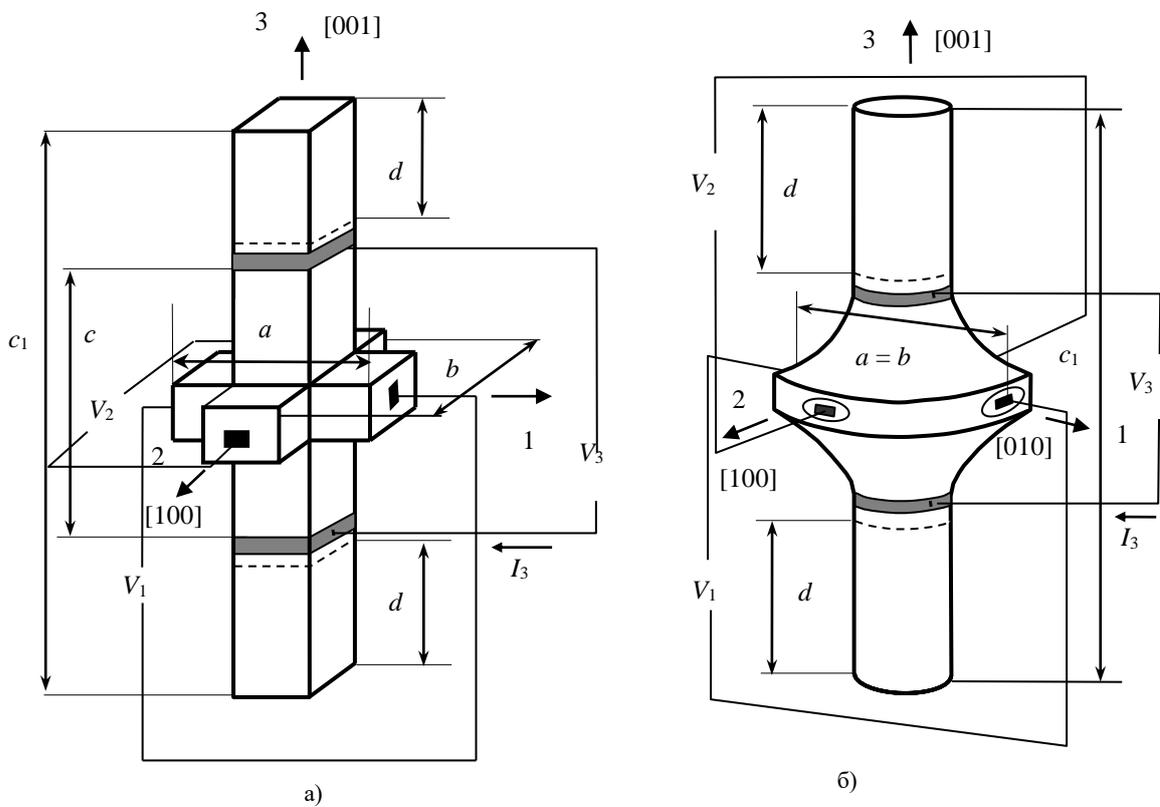


Рис. 5. Объёмные двухкомпонентные полупроводниковые измерители касательных напряжений:  
 а – полученный путем резки; б – путем токарной обработки

На упругочувствительном элементе с объёмной проводимостью достаточно сложно выполнить преобразователь из-за несовершенства структуры полупроводникового материала, наличия в нем дислокаций, поверхностных трещин и других дефектов структуры и обработки поверхности [13].

Поэтому в современных конструкциях полупроводниковых датчиков механических величин измеритель обычно выполняется в виде тензомодуля (рис. 6) [16]. Он включает совершенный пленочный преобразователь в виде диффузионной или эпитаксиальной структуры и упругий элемент из монокристаллического полупроводникового или диэлектрического материала. Это позволяет получить надежное соединение упругий элемент – преобразователь, уменьшить габариты преобразователя и разместить его на упругом элементе в зоне максимальной чувствительности.

Таблица 2

Варианты кристаллографических ориентаций измерителя внутренних касательных напряжений из кремния по рисункам 4 – 6 с зависимостью выходного сигнала от одной компоненты напряжений

№ варианта	Кристаллографическое направление		
	1	2	3
1	[001]	[010]	[100]
2	[1 $\bar{1}$ 0]	[110]	[001]
3	[110]	[1 $\bar{1}$ 0]	[001]
4	[110]	[001]	[1 $\bar{1}$ 0]

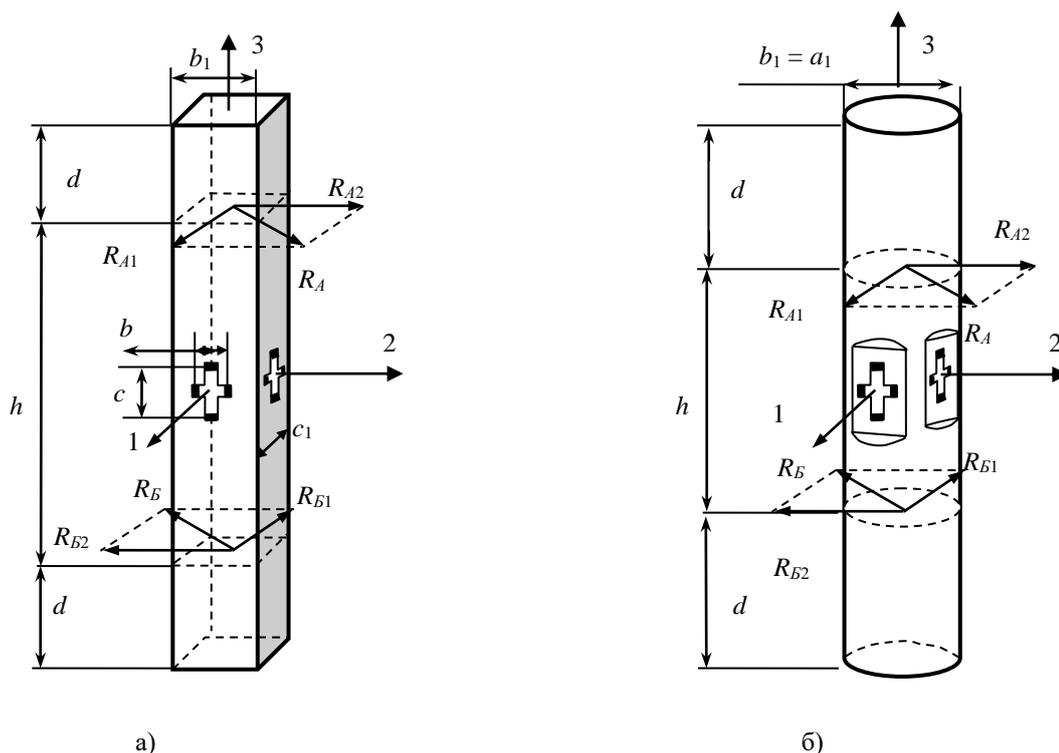


Рис. 6. Полупроводниковые измерители двух компонент касательных напряжений с мнимым интегрированием: а – со стержнем квадратного сечения; б – со стержнем круглого сечения

При квадратной и круглой форм сечения измерителя датчика касательных напряжений, конструкция упругого элемента имеет одинаковый момент сопротивления сдвигу для двух компонент касательных напряжений. По длине стержня можно выделить базу для размещения преобразователя, а концы стержня при этом могут выполнять функции элементов ввода касательных напряжений и анкерных устройств датчика в среде. Площадь поперечного сечения стержня определяет значение допустимой величины обратной упругой реакции на среду, в которой производится измерение напряжений. Длина стержня определяет такие параметры, как надёжность контакта со средой, базу измерений, количество размещаемых одновременно на нем основных и резервных преобразователей.

Материал упругого элемента имеет более высокий модуль сдвига по сравнению с материалами измеряемых сред из композиционных материалов на основе органических и минеральных вяжущих (см. табл. 1). Это позволяет подбором сечения и длины измерителя достичь оптимального соотношения жесткости датчика и его чувствительности.

Такая форма измерителя касательных напряжений способна эффективно воспринимать измеряемые напряжения, обеспечить их передачу в материале среды и получить на выходе преобразователя сигнал, значение которого будет определяться не деформациями среды, а напряжениями в ней.

Зоны электроконтактов можно не защищать от влияния нормальных компонент тензора напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  при измерениях в неэлектропроводящих средах. Практически требуется защита зон электроконтактов от загрязнения и механических повреждений.

Размеры датчиков касательных напряжений зависят от поставленных целей измерения, размеров среды, в которой предполагается проведение измерений, от возможностей технологии изготовления и монтажа элементов датчика. Можно руководствоваться рекомендациями, приведенными в [4], устанавливающими методы градуировки, методику закладки датчиков в измерительную среду и учета влияющих факторов на результаты измерений. Современные технологии изготовления предложенных датчиков касательных напряжений позволяют изготовить их размерами от 1 до 100 мм. Это дает возможность оценивать в среде как контактные напряжения, так и средние интегральные значения по сечению.

#### Выводы

1. На основе анализа известных решений датчиков касательных напряжений предложены конструкции датчика с элементами ввода напряжений в измеритель, являющимися анкерами в среде.
2. Для предложенных конструкций датчиков касательных напряжений разработаны схемы измерителей напряжений на основе сдвигового пьезорезистивного эффекта в полупроводниках, позволяющих измерять одну и две компоненты напряжений.
3. Разработанные конструкции датчиков касательных напряжений наиболее полно соответствуют требованиям к измерительным устройствам для преобразования распределенных векторных величин – внутренних механических напряжений в выходной сигнал.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фомица, Л.Н. Полупроводниковые преобразователи для измерения механических напряжений / Л.Н. Фомица. – Минск: Вышэйшая школа, 1983. – 123 с.
2. Фомица, Л.Н. Измерение напряжений в железобетонных конструкциях / Л.Н. Фомица, Р.А. Сумбатов. – Киев: Будівельник, 1994. – 165 с.
3. Петрашень, И.Р. Совершенствование методики измерения напряжений в грунте: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.Р. Петрашень; НИИ Гидропроекта им. С.Я. Жука. – М., 1978. – 28 с.
4. Соммал, О.Ю. Напряжения в бетоне и прогнозирование технических ресурсов в бетонных и железобетонных конструкциях и сооружениях / О.Ю. Соммал. – Таллин: Валгус, 1980. – 202 с.
5. Тензометрические приборы для исследования строительных конструкций / под ред. Д.С. Баранова. – М.: ЦНИИСК, 1971. – 162 с.
6. Пьезоэлектрический датчик касательных напряжений: а.с. №1254319 СССР МКИ G01L 9/08. / В.В. Булавин, Н.В. Писцов. – № 3837287/24-10; заявл. 04.01.85; опубл. 30.08.86 // Открытия. Изобретения. – 1986. – № 32. – С. 171.
7. Мурзенко, Ю.Н. Разработка конструкций и исследования характеристик мессдозы для измерения полного тензора напряжений в массиве грунта основания / Ю.Н. Мурзенко, В.В. Лифанов, В.В. Ревенко // Основания и фундаменты: межвуз. сб. – Новочеркасск, 1976. – С. 38 – 44.
8. Бауман, Э. Измерение сил электрическими методами / Э. Бауман. – М.: Мир, 1978. – 430 с.
9. Файнбурд, В.М. Контактные задачи теории упругости / В.М. Файнбурд. – М.: Наука, 1975. – 56 с.
10. Сенук, Д.П. Развитие метода и результаты исследований напряжений в осадочных, в том числе многолетнемерзлых породах, фотоупругими датчиками: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.07 / Д.П. Сенук. – Новосибирск, 1980. – С. 18.
11. Рвачев, В.Л. Контактные задачи теории упругости для неклассических областей / В.Л. Рвачев, В.С. Проценко. – Киев: Наукова думка, 1977. – 235 с.
12. Рудицын, М.Н. Справочное пособие по сопротивлению материалов / М.Н. Рудицын, П.Я. Артемов, М.И. Любошиц. – Минск: Вышэйшая школа, 1970. – 628 с.
13. Концевой, Ю.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю.А. Концевой, Ю.М. Литвинов, Э.А. Фаттахов. – М.: Радио и связь, 1982. – 237 с.
14. Расширение температурного диапазона работы полупроводниковых тензометрических датчиков / Ю.И. Заганяч [и др.] // Приборы и системы управления. – 1979. – № 3. – С. 25 – 26.
15. Лесковец, С.В. Использование эффекта поперечной пьезоЭДС в полупроводниковых преобразователях датчиков внутренних касательных напряжений / С.В. Лесковец // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2007. – № 2. – С. 104 – 111.

16. Ваганов, В.И. Интегральные тензопреобразователи / В.И. Ваганов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.

*Поступила 24.11.2006*