

# ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

**Михайленко И.В.**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

**Орлов А.Т.**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

**Сердега Б.К.**

Институт физики полупроводников имени В.Е. Лашкарева  
Национальной академии наук Украины

## ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПОПЕРЕЧНОЙ ТЕНЗОЭДС

*Рассмотрены ключевые требования к промышленному преобразователю давления средней точности. Изложен физический принцип функционирования преобразователя в случае биполярной и монополярной проводимостей полупроводникового кристалла. Проанализированы компоненты погрешности преобразователя и их источники. Предложена оптимальная конфигурация чувствительного элемента интегрального преобразователя давления. Оптимизированы топология упругого элемента и конструкция интегрального преобразователя давления.*

**Ключевые слова:** интегральный преобразователь давления, эффект тензоэдс, мезаструктура, тензопреобразователь, концентраторы напряжения.

**Постановка проблемы.** Производство полупроводниковых преобразователей для общепромышленного применения возможно исключительно серийным их изготовлением средствами современной микроэлектронной технологии. В таком случае на первый план при массовом применении интегрального преобразователя давления (далее – ИПД) выходит вопрос разработки прибора среднего класса точности. Последняя определяется динамическим диапазоном измеряемой величины, высокой надежностью, сроком службы и стабильностью характеристик преобразования во времени, а также минимизацией разброса параметров в серии [1].

В результате функциональной интеграции, характерной для ИПД, традиционное деление прибора на узлы теряет смысл. Все же для описания функциональных элементов ИПД будут использованы термины «чувствительный элемент» (далее – ЧЭ), «упругий элемент» (далее – УЭ),

«первичный» и «вторичный» преобразователи, отдавая дань их условности.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время наиболее распространены в ИПД, как и в дискретных применениях, тензорезисторные мостовые схемы. Из множества их вариантов [2–4] наиболее совершенными стали преобразователи [5–7], объединяющие четыре резистора моста в один элемент электронной цепи. Встроенный средствами интегральной технологии (диффузией, имплантацией) в упругий элемент механики – кремниевую мембрану, он становится неотъемлемой ее частью. Физические основы их функционирования подробно рассмотрены в [8], а здесь представим только принцип функционирования и схему, необходимые для систематизации источников погрешностей.

**Постановка задания.** Целью работы является проведение анализа физико-технических источ-

ников погрешности ИПД и рассмотрение путей повышения его класса точности.

**Изложение основного материала исследования. Физические основы тензоэффекта в кристаллах Ge, Si.**

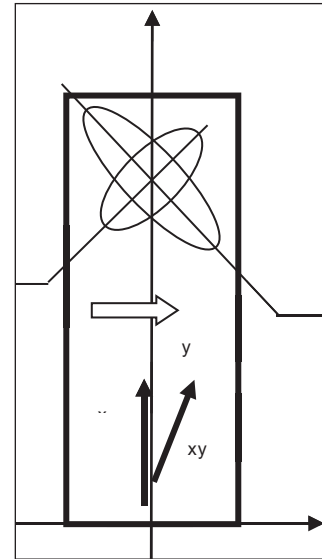
Принцип действия тензопреобразователя (далее – ТП) основан на появлении в кристаллах анизотропии проводимости, индуцированной внешним механическим усилием. На рис. 1 показана схема ТП в виде ограниченного кристаллического образца с биполярной электропроводностью, в котором анизотропия создана одноосной деформацией в x-направлении. Детальное рассмотрение теоретических основ возникновения тензоэдс при прохождении электрического тока через анизотропный кристалл изложено в [8]. Здесь ограничимся только изложением уравнения, описывающего протекание тока в образце, в котором главной особенностью является присутствие коэффициента при третьем слагаемом  $a_{xy}$ :

$$\frac{\partial p}{\partial t} - D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - a_{xy} \frac{eD}{2kT} E_x \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{p - p_i}{\tau} = 0. \quad (1)$$

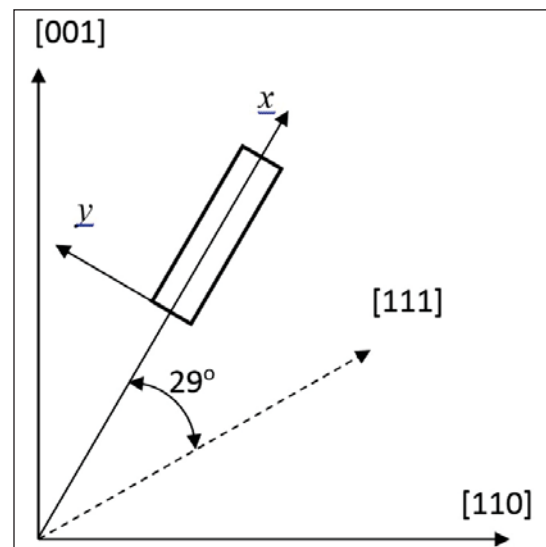
Его физический смысл состоит в определении величины анизотропии проводимости:

$$a_{yx} = \frac{u_{xy}^n}{u_{yy}^n} - \frac{u_{xy}^p}{u_{yy}^p}, \quad (2)$$

которая состоит в разности отношений парциальных компонент подвижностей электронов и дырок  $u_{xy}/u_{yy}$ . Кристаллографическая ориентация выбирается так, чтобы соотношение (2)  $a_{xy} \neq 0$ , что достигается, когда диагональные компоненты тензора проводимости (подвижности электронов  $u_{max}^n$  и дырок  $u_{max}^p$ ) не совпадают с направлением внешнего поля. На рис. 1 изображена его модель, в которой электрическое поле  $\vec{E}_x$  и сжимающее усилие приложено в направлении  $0x$ . Поскольку направление поля заведомо не совпадает с направлениями максимальных подвижностей, то, вследствие отклонения плотности тока  $J_{xy}$  от коллинеарности относительно вектора поля, возникает поперечный поток электронов и дырок или только одного из них. В случае биполярной проводимости (собственной, инжектированной светом или контактом) возникает эффект поперечного потока носителей заряда и их локализации у одной из боковых поверхностей образца. Однако в образовавшемся неоднородном распределении концентрации носителей отсутствует поперечная компонента электрического поля  $\vec{E}_y$  вследствие компенсации заряда противоположными знаками. В таком случае тензоэффект заключается в изменении величины тока  $J_x$ , который зависит не только от величины деформации (параметра  $a_{xy}$ ), согласно (2), но

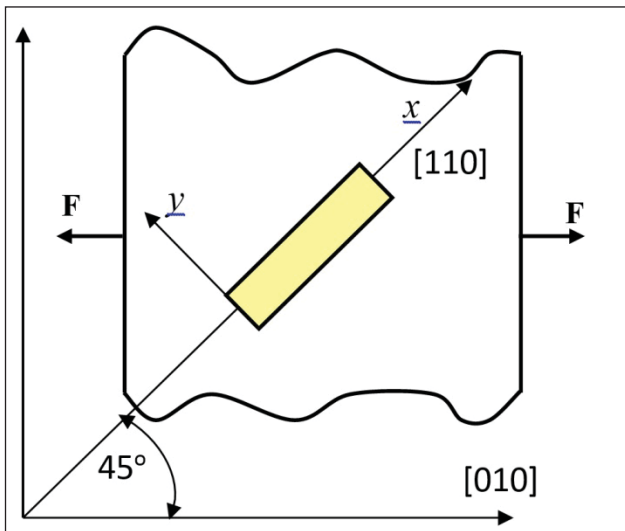


**Рис. 1. Схема возникновения поперечной анизотропии проводимости в образце изотропного кристалла кремния под действием одноосного упругого сжатия вдоль оси  $0X$**

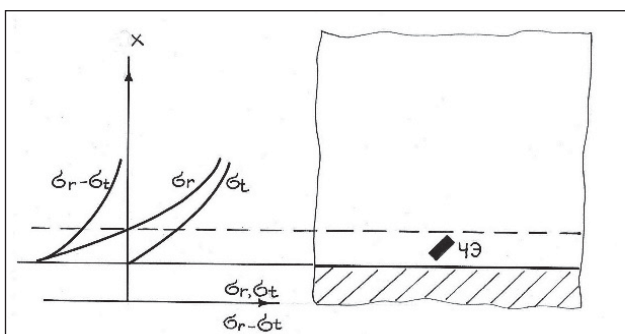


**Рис. 2. Оптимальная кристаллографическая ориентация кристалла в случае монополярной проводимости в дискретном ТП**

и в значительной степени от рекомбинационных свойств  $\pm u$ -поверхностей образца. Рассмотрим два случая монополярной проводимости. В первом из них, характерном для дискретного ТП, направления деформации и тока от приложенного поля коллинеарны (рис. 2) [9]. Здесь условие (2)  $a_{xy} \neq 0$  выполняется в силу того, что направление ориентации образца находится под углом к кристаллографическим осям высокой симметрии. Понижение симметрии одноосной деформацией приводит к появлению эллипсоида проводимости, главные оси которого не совпадают с направлением тока. Воз-



**Рис. 3. Оптимальная кристаллографическая ориентация кристалла в случае монополярной проводимости для интегрального ТП.**  
**F – сила внешней среды, обеспечивающая одноосную деформацию**



**Рис. 4. Эпюры напряжений на периферии плоской мембраны**

никновение вследствие этого поперечного потока носителей приводит к появлению разности потенциалов в  $y$ -направлении, которая является мерой анизотропии. Следует обратить внимание на то, что оптимальная ориентация ТП требует его расположения на кристаллографической плоскости типа (110), которая обычно не используется в стандартных пластинах-подложках (wafers), изготовленных по кремниевой микроэлектронной технологии.

Отмеченное обстоятельство учтено во втором случае топологического размещения ТП (рис. 3), который является предпочтительным по причине распространенного использования кристаллической плоскости с индексами (100). Однако при этом условии неколлинеарность направлений тока и деформации является обязательной и, для максимального эффекта, должна составлять угол  $45^\circ$  относительно осей кристалла типа [100]. Такое

условие осуществимо практически интегрированием ЧЭ ТП в кремниевую пластину. Такая пластина является упругим элементом механики, преобразующим распределенное давление измеряемой среды в одноосную деформацию. ЧЭ располагается либо на ее периферии, где радиальная компонента деформации не равна нулю, либо в том месте, в котором специальный профиль удовлетворяет требуемым условиям.

**Источники погрешностей и их анализ.**

Одним из уязвимых мест тензорезисторных ИПД является то, что четыре тензорезистора принципиально должны располагаться в различных местах мембраны. При этом неоднородное изменение механических напряжений с температурой по контуру прикрепления упругого элемента к корпусу датчика или локальных напряжений на границе кремний – окисел (или кремний – нитрид), а также возможная пространственная неоднородность токов утечки на границе тензорезистор – подложка могут стать причиной более или менее значительного дрейфа нуля вследствие неодинакового изменения сопротивлений тензорезисторов. Точность согласования характеристик отдельных тензорезисторов, являясь в ИПД весьма высокой, все же остается конечной, что дополнительно приводит к увеличению аддитивной составляющей выходного сигнала.

Неидеальности ИПД выражаются, как и в случае дискретных преобразователей, в следующих проявлениях:

- изменение чувствительности ИПД с температурой – мультипликативная компонента;
- температурный и временной дрейф нулевого сигнала ИПД – аддитивная квазистационарная компонента;
- шумовая составляющая выходного сигнала – аддитивная нестационарная компонента;
- нелинейность характеристики ИПД.

Наиболее актуальной для снижения приведенной погрешности является задача минимизации второй из перечисленных составляющих, поскольку остальные три в различных приложениях могут являться не критичными либо быть относительно легко скомпенсированы во вторичном преобразователе. Большинство опытных и промышленных образцов ИПД, разработанных в Украине и за рубежом, характеризуются значительным дрейфом нулевого сигнала, достигающим 10...30% от значения номинального сигнала в диапазоне температур  $-40...+120^\circ\text{C}$  [2; 3; 4; 5]. Минимизация аддитивной составляющей выходного сигнала и ее зависимости от дестабилизиру-

ющих факторов, являясь проблемой в дискретных преобразователях, усугубляется в ИПД широкого применения по двум причинам. Во-первых, функциональная интеграция и сокращение размеров ИПД приводит к повышению взаимных зависимости и влияния элементов (областей) ИПД. Второй причиной является тенденция сведения к минимуму индивидуальных операций при изготовлении и настройке ИПД и, в идеале, исключение последних. С другой стороны, групповые методы изготовления ИПД дают разработчику уникальную возможность унификации и согласования параметров элементов и отдельных преобразователей в партии.

В настоящей работе снижение аддитивной составляющей выходного сигнала ИПД достигается следующими мерами:

- выбором соответствующего принципа действия и конфигурации первичного преобразователя;
- оптимизацией топологии и конструкции упругого элемента ИПД, технологии его изготовления;
- тщательным выбором способа сборки и средств крепления ИПД к внешним конструктивным элементам (заделка ИПД).

Анализ литературных данных показывает, что игнорирование любого из этих факторов может свести на нет эффект учета остальных. Из этого следует вывод о том, что разработка ИПД среднего класса точности (1%) для массовых применений, работающих в широком температурном диапазоне, требует комплексной и взаимосвязанной оптимизации принципа действия первичного преобразователя, топологии ИПД в целом, технологии изготовления и сборки приборов. Применение соответствующих методов обработки выходного сигнала во вторичном преобразователе [6; 7] можно рассматривать как хорошее дополнение к исходной оптимизации, обеспечивающее дальнейшее повышение метрологических характеристик ИПД.

Перечисленные соображения определяют задачи разработки интегрального преобразователя давления для общепромышленных применений.

**Выбор типа чувствительного элемента интегрального преобразователя давления.** ТП изготавливается из полупроводника с определённой кристаллографической ориентацией, обеспечивающей максимальное значение параметра анизотропии, а с ним и чувствительности ТП. В [12] показано, что абсолютный максимум модуля

тригонометрического полинома, определяющего ПА, достигается, например, при ориентации по рис. 2:

$$\begin{pmatrix} 0,305 & 0,305 & 0,902 \\ -0,638 & -0,638 & 0,432 \\ 0,707 & -0,707 & 0 \end{pmatrix}$$

Помимо абсолютных экстремумов рассматриваемая функция имеет ряд локальных экстремумов. Из них представляет практический интерес семейство экстремумов, расположенных в двенадцати направлениях, при которых преобразователь расположен в плоскости типа (100) по рис. 3, описываемых матрицей:

$$\begin{pmatrix} 0,924 & 0,383 & 0 \\ -0,383 & -0,924 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

По приведенным выше соображениям для реализации ТП в интегральном исполнении был выбран второй тип ориентации, как более практичный, хотя и уступающий абсолютному максимуму чувствительности, достигаемому в первом случае на 12%.

По сравнению с тензорезисторными мостовыми схемами ЧЭ ИПД на основе эффекта тензоэдс (далее – ИТЭПД) имеет следующие преимущества:

1. ЧЭ не проявляет температурного дрейфа выходного сигнала в отсутствие деформации, если технологически была достигнута эквипотенциальность выходных электродов (симметрия ЧЭ). Это означает, что для ИТЭПД, не соединенного с корпусом, аддитивная компонента выходного сигнала практически отсутствует.

2. В отличие от тензорезисторного моста, ЧЭ не чувствителен к изотропной поверхностной деформации, возникающей в связи с разницей в ТКР кремния и диэлектрических покрытий, а также к симметричной поверхностной деформации в направлении [100], если поверхность пластины совпадает с плоскостью (100), вследствие эффекта Пуассона.

3. Поскольку ЧЭ является генератором напряжения, при использовании его в режиме, близком к режиму холостого хода, по выходу число контактов, вносящих шумовую компоненту в выходной сигнал, составляет два против восьми в тензорезисторном мосте. Кроме того, дрейф сопротивления контактов в таком ЧЭ не приводит к дрейфу аддитивной компоненты выходного сигнала.

4. ЧЭ является локальным функциональным аналогом тензорезисторного моста и поэтому его эквипотенциальность в отсутствие давления, кроме геометрических факторов, определяется

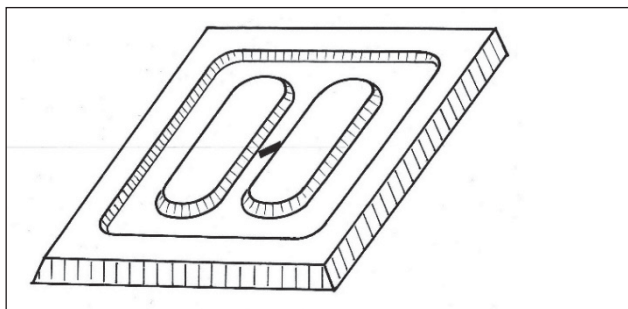


Рис. 5. Форма упругого элемента ИТЭПД – мезаструктура. Пропорции не соблюдены

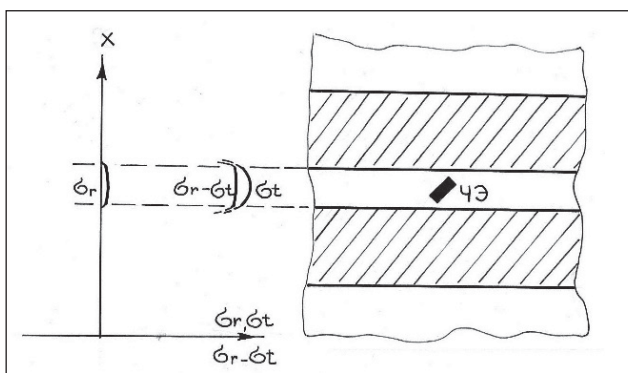


Рис. 6. Эпюры напряжений между островками-концентраторами

однородностью диффузии или имплантации на площади самого преобразователя, а не всей площади мембраны, как в случае распределенного тензорезистивного моста [12]. Таким образом, при типичных размерах мембраны  $2\ 000 \times 2\ 000\ \mu\text{м}^2$  и ЧЭ  $100 \times 200\ \mu\text{м}^2$  получается выигрыш по этому фактору по крайней мере на порядок.

Единственное, в чем ИТЭПД уступает ИПД с четырехплечим активным тензорезисторным мостом, – это вдвое меньшая, при прочих равных условиях, чувствительность.

Приведенные соображения позволяют сделать вывод, что преобразователи на основе эффекта тензоэдс наиболее перспективны для интегральных датчиков давления в связи с отсутствием в их характеристиках ряда существенных недостатков, присущих тензорезисторным мостам [13–15]. Подтверждение сказанного – приемлемые параметры единственного серийно выпускаемого интегрального датчика давления на основе эффекта тензоэдс [2; 3].

**Оптимизация топологии упругого элемента и конструкции интегрального преобразователя давления.** Основным для ИТЭПД условием высокой эффективности преобразования давления в пропорциональный электрический сигнал явля-

ется максимальная разность продольной и поперечной компонент механического напряжения в области расположения ЧЭ. Как уже отмечалось, в случае ориентации преобразователя по рис. 3 соответствующие компоненты должны быть направлены вдоль осей  $\langle 110 \rangle$ , а тянущее поле прикладывается в направлении  $\langle 100 \rangle$ . Такое взаимное расположение направлений деформации и тянущего поля дает по сравнению с коллинеарным случаем выигрыш по чувствительности в 1,41 раза. Наиболее простая реализация этих условий – выбор соответствующей области на периферии однородной плоской мембраны для размещения ЧЭ – использован в [10]. При таком решении ЧЭ располагается в области существенно неоднородной деформации (рис. 4). Высокие градиенты радиальной и тангенциальной компонент механического напряжения и зависимость эпюр напряжения от глубины травления обуславливают критичность к точности позиционирования ЧЭ. Это обстоятельство, а также подверженность влиянию механических напряжений, возникающих на периферии упругого элемента, заставляют искать другие решения.

Эффективность преобразования гидростатического давления в одноосное напряжение можно повысить, используя в качестве упругого элемента мембрану сложного профиля с концентраторами напряжения [16–18]. Реализация такого подхода определила выбор в качестве упругого элемента ИТЭПД симметричной мембраны с двумя островками – утолщениями, играющими роль концентраторов. На рис. 5 условно показана ее форма. ЧЭ расположен в центре мембраны между островками, его продольная ось составляет  $45^\circ$  с осью симметрии мембраны. Такая конфигурация обеспечивает эффективное преобразование давления измеряемой среды в одноосное напряжение и в то же время максимально возможную удаленность первичного преобразователя от области возникновения термоупругих напряжений на периферии мембраны. Градиенты продольной и поперечной компонент механического напряжения в центральной области такого УЭ близки к нулю (рис. 6), что значительно снижает требования к точности позиционирования ЧЭ по сравнению с [10]. Аналитический расчет трехмерного УЭ со сложным профилем, учитывающий анизотропию механических свойств кремния, требует высокоресурсных вычислений по методу конечных элементов, поэтому оптимизация микропрофиля мембраны производилась эмпирически, на основании приближенных расчетов.

Следствием отмеченного во введении процесса физико-конструктивной интеграции преобразователей и специфической особенностью ИПД является существенное влияние конструкции ИТЭПД на его параметры. Неудачно выбранный метод крепления первичного преобразователя к корпусу или несогласованные коэффициенты расширения материалов корпуса и упругого элемента служат источниками аддитивной погрешности. Эффективными методами минимизации погрешностей, связанных с эффектами температурного расширения, является соединение кремниевой мембраны с кремниевой же подложкой [14] или со стеклянной подложкой с подобранным температурным коэффициентом расширения (далее – ТКР) по отношению к кремнию. Немаловажным фактором является также и форма подложки, а именно, ее жесткость, приведенная к контуру крепления, которая должна соответствовать жесткости упругого элемента.

С учетом этих соображений наиболее рациональной представляется конструкция ИТЭПД, состоящая из двух соединенных пластин кремния, каждая из которых имеет вытравленные участки – т. н. мезаструктура (рис. 7). При изготовлении преобразователя абсолютного давления соединение производится в вакууме. В центре одной из пластин, которая является УЭ, располагается ЧЭ, а на ее периферии – термочувствительный элемент схемы термокомпенсации. На поверхности второй пластины, которая является крышкой, вытравливается полость, совпадающая по размерам с наружным контуром мембраны. Толщина тонкой части крышки выбирается из соображений жесткости, которая должна приближаться к жесткости чувствительного элемента [11]. К внешним конструктивным элементам ИТЭПД крепится внешней поверхностью крышки с помощью резиноподобного компаунда.

Такая конструкция обеспечивает подавление в зоне расположения ЧЭ термоупругих напряжений, возникающих по контуру скрепления пластин. Дополнительное снижение механических напряжений обеспечивает двойная оправа УЭ (экранный кольцо) [20] (на рис. 4.3 и 4.4 не показана). Последняя на порядок снижает воздействие температурных деформаций по контуру скрепления на выходной сигнал ИТЭПД. Неизбежная при этом потеря жесткости, а с ней и перегрузочной способности упругого элемента [10], частично компенсируется за счет наличия островков от области возникновения концентраторов [13].

**Результаты испытаний тестовых образцов.** Различные варианты предлагаемой техно-

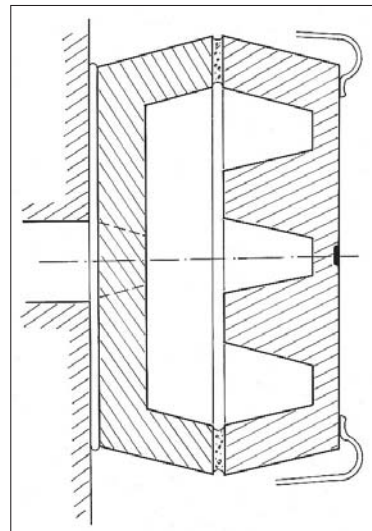


Рис. 7. Поперечное сечение ИТЭПД предлагаемой конструкции. Пропорции не соблюдены

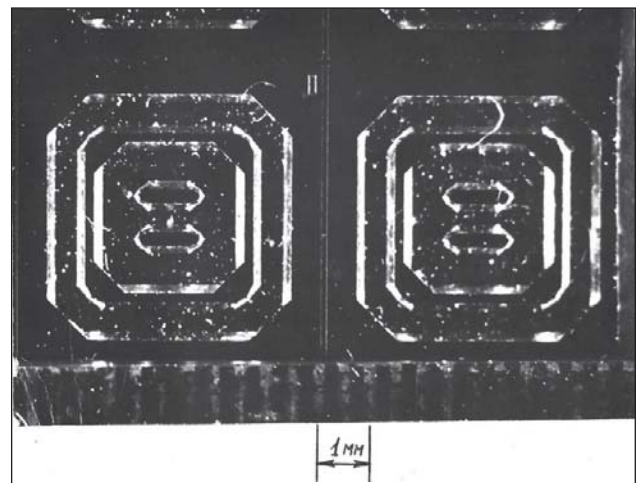


Рис. 8. Мезаструктуры ИТЭПД, полученные щелочным анизотропным травлением

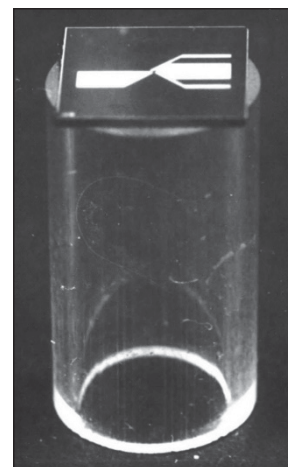


Рис. 9. Закреплённый ИТЭПД

логии были опробованы в следующих организациях: ИП АН УССР; ПО «Кристалл», г. Киев; НИИ «Шторм», г. Одесса; НПО «Интеграл», г. Минск. В результате, были изготовлены и испытаны тестовые партии ИТЭПД.

На рис. 8 и 9 приведены микрофотографии изготовленных структур и ИТЭПД, закрепленного на трубке из боросиликатного стекла с помощью технологии, описанной в [21].

Чувствительность ИТЭПД с мембраной толщиной 100 мкм и рабочим диапазоном давлений 0...1 МПа оказалась равной 0,02 1/МПа при напряжении питания 5 В. Значение нулевого сигнала при 300 К для большинства испытанных образцов составило 0,5...1,5 мВ. Дрейф нулевого сигнала для 90% ИТЭПД, не соединенных с корпусом, составил менее 1 мВ в диапазоне температур 233...393 К, причем два образца обнаружили дрейф порядка 0,2 мВ. При соединении с корпусом дрейф нулевого сигнала возрастал до 2 мВ в том же диапазоне температур, что

составляет 2% от выходного сигнала 100 мВ при номинальном давлении 1 МПа. При испытании на перегрузку УЭ разрушение мембраны наступало при 2,0 МПа, т. е. при 100%-ной перегрузке. Таким образом, результаты испытаний пробных образцов подтвердили эффективность принятых физико-технологических решений, обеспечивших достаточно высокие параметры предлагаемого ИТЭПД.

#### Выводы:

1. Рассмотрены физические основы ЧЭ ПД и предложен тип ЧЭ на основе тензоэдс как оптимальный с точки зрения реализации ИПД.

2. Рассмотрены источники погрешности ИПД и намечены пути их конструктивной минимизации.

3. На основе комплексной физико-конструктивно технологической оптимизации ИПД предложены топология упругого элемента, конструкция и способ сборки ИПД с рабочим диапазоном давлений 0...1 МПа в диапазоне температур 233–393 К, с погрешностью < 2%.

#### Список литературы:

1. Barlian A., Park W-T., Mallon J., Rastegar A., Pruitt B. Review: Semiconductor piezoresistance for microsystems. Proc IEEE Inst Electr Electron Eng. 2009. №97(3). P. 513–552. DOI:10.1109/JPROC.2009.2013612.
2. Borney J., Wise K. Integrated signal conditioning for silicon pressure sensors. IEEE Transactions on Electron Devices. 1979. Vol. ED-26. № 12. P. 1906–1910.
3. Стучебников В. Полупроводниковые интегральные тензорезисторные преобразователи механических величин. Измерения, контроль, автоматизация. 1983. № 1 (45). С. 30–42.
4. Ваганов В. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
5. Жадько И., Романов В., Сердега Б. Полупроводниковый датчик механических усилий. А.С. № 439690. 1972.
6. Бабичев Г., Ваганов В., Жадько И., Романов В., Сердега Б. Интегральный преобразователь давления. Авт. свид. № 1438404. 1987.
7. Гридчин В., Круглов В. Интегральный тензопреобразователь на поперечной тензоэдс. Физика и техника полупроводников: сборник научных трудов / МВ и ССО РСФСР. НЭТИ. Новосибирск. 1976.
8. Бойко И., Жадько И., Рашба Э., Романов В. Возникновение неравновесных носителей при прохождении тока через упруго деформированный германий. Физика твердого тела. 1965. Т. 7. Вып. 7. С. 2239–2242.
9. Жадько И., Романов В., Сердега Б. Тензодатчик. Авт. свид. № 401291. Опубл. 22.02.77. Бюллетень ОИПОТЗ. № 7.
10. Аллен Р. Крестообразный датчик давления. Электроника. 1980. № 21. С. 9–10.
11. Аллен Р. Новые области применения кремниевых полупроводниковых датчиков. Электроника. 1980. № 24. С. 28–41.
12. Ваганов В. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136с.
13. Ваганов В., Немчинов В. Основные направления применения микропроцессоров с датчиками. Датчики на основе технологии микроэлектроники: материалы семинара. М. 1983. С. 33–37.
14. James J. Allen. Micro Electro Mechanical System Design. 2005. CRC Press. 496 p.
15. Pearson G., Reed W., Feldman W. Deformation and fracture of small silicon crystals. Acta Metallurgica. 1957. Vol. 5. P. 181.
16. Wilner L.B. A diffused silicon pressure transducer with stress concentrated at transverse gauges. ISA Transactions. 1978. Vol. 17. № 1. P. 83–91.
17. Kim S.-C., Wise K. Temperature sensitivity in silicon piezoresistive pressure transducers. IEEE Transactions on Electron Devices. 1985. Vol. ED-50. № 7. P. 801–810.
18. Поливанов П. Кремниевый мембранный чувствительный элемент с двойной оправой. Приборы и системы управления. 1979. № 7. С. 30.

19. Broeks A., Donovan R., Hardesty C. Low-temperature electrostatic silicon-to-silicon seals using sputtered borosilicate glass. *Journal of Electrochemical Society*. 1972. Vol. 119. № 4. P. 545–546.

20. Mikhailenko I., Orlov A., Serdega B. Diagnostics of thermal stress in MEMS pressure transducer based on Tenso-e.m.f. Effect. *Proceedings of the 2017 IEEE 37th International Scientific Conference “Electronics and nanotechnology” (ELNANO-2017)*. Kyiv: IEEE, 2017, P. 201–204.

21. Михайленко І., Орлов А., Сердега Б. Модуляционно-поляризационная диагностика термонапряжений в интегральном преобразователе давления. *Физика и техника полупроводников*. Вып. 4. 2017. С. 524–528. DOI: 10.21883/0000000000.

### **ІНТЕГРАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ НА ОСНОВІ ЕФЕКТА ТЕНЗОЕРС**

*Розглянуті ключові вимоги до промислового перетворювача тиску середньої точності. Проаналізовані компоненти погрішності перетворювача та їхні джерела. Запропонована оптимальна конфігурація чутливого елемента інтегрального перетворювача тиску. Оптимізовані топологія пружного елемента та конструкція інтегрального перетворювача тиску.*

**Ключові слова:** інтегральний перетворювач тиску, первинний та вторинний перетворювачі, ефект тензоерс, тензоперетворювач, мезаструктура, концентратори напруги.

### **INTEGRATED SILICON PRESSURE TRANSDUCER BASED ON TENSO-EMF EFFECT**

*Reviewed key requirements for industrial pressure transducer of medium accuracy. Analyzed measurement error components and their origins. Proposed optimal configuration of sensitive element of integrated pressure transducer. Optimized topology of the elastic element and the integrated pressure transducer design.*

**Key words:** integrated pressure transducer, primary and secondary converter, tenso-emf effect, tenso-transducer, mesa-structure, isles-concentrators of strain.