

2. *Манохин А.Ю.* Стратегия развития малого и среднего предпринимательства в современной России: Монография. // НОУ ВПО Российский новый университет (Тамбовский филиал). URL: <http://www.tambov-rosnou.ru/monograf/> (дата обращения: 01.07.2012).
3. *Адизес И.К.* Управление жизненным циклом корпорации. – СПб.: Питер, 2007. – 384 с.
4. *Питерс, Томас Дж., Уотерман-мл., Роберт Х.* В поисках совершенства: уроки самых успешных компаний Америки / Пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2005. – 560 с.
5. *Кроуфорд Ф., Метьюс Р.* Миф о совершенстве. – М.: РОСМЕН-ПРЕСС, 2005. – 239 с.
6. *Важдает А.Н.* Применение принципа открытого управления в малых предприятиях с несколькими видами деятельности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 225-230.
7. *Важдает А.Н.* Модель и алгоритм анализа процесса самоорганизации новых инвестиционных проектов на основе предшествующих // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 2 (91). – С. 46–49.
8. Комплексная программа социально-экономического развития Юргинского городского округа Кемеровской области. / Официальный сайт администрации города Юрги. URL: [http://www.adm.yrg.kuzbass.net/pagedata/00000181/files/kpsr1\\_2025.pdf](http://www.adm.yrg.kuzbass.net/pagedata/00000181/files/kpsr1_2025.pdf) (дата обращения: 01.10.2012).
9. Программный продукт «Справочник ОКВЭД». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tradesoft.ru>.
10. *Важдает А.Н.* Математическая модель оценки развития малого предприятия на основе анализа cash-flow между его видами деятельности // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 91-94.
11. Доклад руководителя администрации Юргинского городского округа о достигнутых значениях показателей для оценки эффективности деятельности органов местного самоуправления городских округов и муниципальных районов за 2012 год и их планируемых значениях на 3-летний период / Официальный сайт администрации города Юрги. URL: <http://www.adm.yrg.kuzbass.net/pagedata/00000536/doklad.pdf> (дата обращения: 01.03.2014).
12. Информационная система «Контур Фокус». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://focus.kontur.ru/capabilities>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Петраков.

**Важдает Андрей Николаевич** – Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета (ЮТИ ТПУ); e-mail: [ytitpu@tpu.ru](mailto:ytitpu@tpu.ru); 652050, Кемеровская область, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26; тел.: 83845164942; кафедра информационных систем; старший преподаватель.

**Vajdaev Andrey Nikolaevich** – Yurga Institute of Technology of National Research Tomsk Polytechnic University; e-mail: [ytitpu@tpu.ru](mailto:ytitpu@tpu.ru); 26, Leningradskaya street, Yurga, Kemerovo region, 652050, Russia; phone: +73845164942; the department of information systems; senior lecturer.

УДК 621. 865. 8

**П.Г. Михайлов, Е.А. Мокров, Д.А. Сергеев, В.В. Скотников, В.А. Петрин,  
М.А. Чернецов**

### **ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

*Задачи исследования физических процессов в условиях повышенных температур становятся все более актуальными по мере развития технологий, освоения новой продукции и процессов (атомно-энергетический комплекс, ракетно-космическая техника, авиация, металлургия, химическая промышленность и проч.). В настоящее время прослеживается тенденция отказа от традиционного материала микроэлектроники монокристаллического кремния, имеющего узкую запрещенную зону и от диффузионных сенсорных структур с изоляцией p–n–переходами. Четко обозначился тренд на использование в чувствительных*

элементах (ЧЭ) датчиков в качестве функциональных материалов широкозонных монокристаллических полупроводников и полупроводниковых соединений. Наиболее перспективным материалом для высокотемпературных микроэлектронных датчиков является синтетический алмаз, но сам материал очень дорогой, а технологии сложные, что затрудняет развитие данного направления. Еще одним из высокотемпературных функциональных материалов для микроэлектронных датчиков является монокристаллический карбид кремния (SiC) (рабочая температура до 600 °С), но для него традиционная кремниевая технология практически не пригодна. Альтернативой алмазу и карбиду кремния могут быть структуры КНД (кремний на диэлектрике) и КНИ (кремний на изоляторе). Основным материалом из группы КНД, который наиболее широко используется в микроэлектронных датчиках, особенно в России, является кремний на сапфире (КНС), ЧЭ на основе которого работоспособны до 300–400 °С в условиях агрессивных сред и радиации.

Датчик; чувствительный элемент; измерительный модуль; ЧЭ; ИМ; высокотемпературный; карбида кремния; КНС; алмаз; КНД; поликремний; кремний; широкозонный диэлектрик; сапфир.

**P.G. Mikhailov, E.A. Mokrov, D.A. Sergeev, V.V. Skotnikov, V.A. Petrin,  
M.A. Chernetsov**

#### **SENSITIVE ELEMENTS OF HIGH- PRESSURE SENSORS. MATERIALS AND TECHNOLOGIES IZGOGOVLINIYA**

*Objectives of the study of physical processes at elevated temperatures become more urgent with the development of technologies, the development of new products and processes (atomic energy complex, rocket and space technology, aviation, metallurgy, chemical industry and so on). Currently, there is a tendency rejection of traditional microelectronics monocrystalline silicon material having a narrow band gap of diffusion and sensory structures insulated pn-junctions. Clearly delineated on the trend in the use of sensitive elements (SE) sensors as functional materials wideband single crystal semiconductors and semiconductor compounds. The most promising material for high-temperature microelectronic sensors is a synthetic diamond, but the stuff is very expensive and sophisticated technology that hinders the development of this direction. Another of the high- functional materials for microelectronic sensors is monocrystalline silicon carbide (SiC) (operating temperature up to 600 °C), but for him the traditional silicon technology practically not suitable. Alternative to diamond and silicon carbide can be CPV structure (silicon on insulator) and SOI (silicon on insulator). The basic material from the group of the CPV, which is most widely used in the microelectronic sensors, especially in Russia, is a silicon-on-sapphire (SOS), based on which the SE operable to 300–400 °C in corrosive environments and radiation.*

*Sensor; sensing element; measurement module; Jae; IM; high temperature; silicon carbide; CND; diamond; CPV; polysilicon; silicon; wide gap; insulator; sapphire.*

Чувствительный элемент (ЧЭ) и измерительный модуль (ИМ) любого датчика являются его основными блоками, которые определяют большинство технических характеристик датчиков физических величин: точность, стабильность, диапазон измерения, рабочие температуры и проч.[1]. При этом основными проблемами при разработке ЧЭ и ИМ высокотемпературных датчиков давления является выбор функциональных материалов и технологий их изготовления [2]. Примеры конструкций высокотемпературных датчиков давления, ЧЭ и ИМ представлены на рис. 1–4 [3–5].

**Анализ функциональных материалов для ЧЭ и ИМ высокотемпературных датчиков.** В настоящее время прослеживается тенденция отказа от традиционного материала микроэлектроники и микроэлектронных датчиков (МЭД), монокристаллического кремния (имеющего узкую энергетическую запрещенную зону) и от диффузионных сенсорных структур с изоляцией р-п-переходами. Четко обозначился тренд на использование в ЧЭ датчиков в качестве функциональных материалов широкозонных монокристаллических полупроводников и полупроводниковых соединений.

Единственным представителем широкозонных монокристаллических полупроводников является алмаз, у которого ширина запрещенной зоны составляет 5,5 эВ при 300 °К.

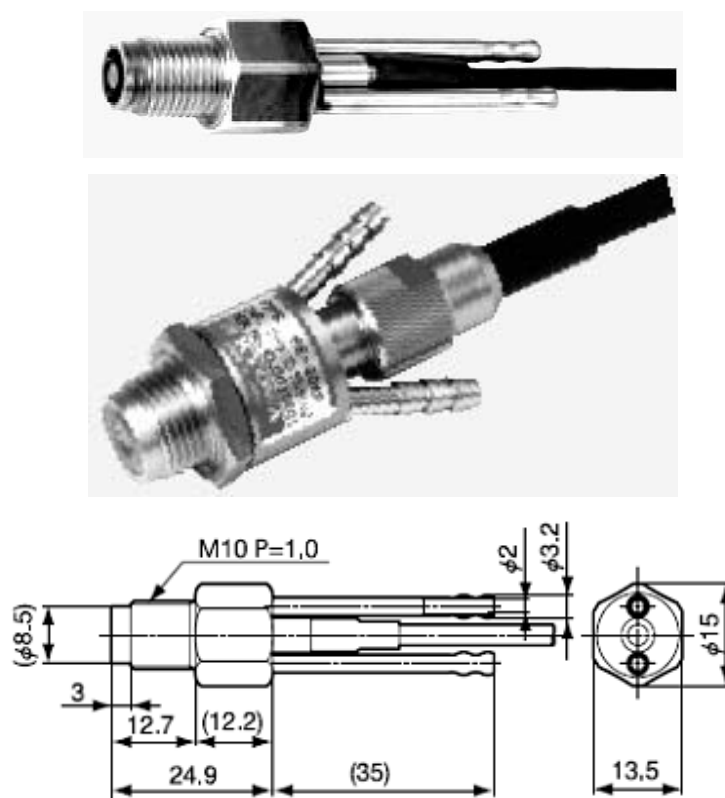


Рис. 1. Охлаждаемые пьезорезистивные датчики давления фирмы Kyowa с температурой эксплуатации до 300 °С (по воде)

К другой группе относятся двойные и тройные полупроводниковые соединения:

- ◆ карбид кремния ( $\beta$  – политип) –  $\beta$  – SiC,  $E_g=2,4$ эВ;
- ◆ арсенид галлия (GaAs),  $E_g=1,43$ эВ;
- ◆ фосфид галлия (GaP),  $E_g=2,24$ эВ;
- ◆ фосфат цинка ( $ZnP_2$ ),  $E_g=2,05$ эВ (тетрагональная фаза);
- ◆  $MgSiP_2$ ,  $E_g=3,1$ эВ;
- ◆  $ZnSiAs_2$ ,  $E_g=2,15$ эВ;
- ◆  $CdSiP_2$ ,  $E_g=2,2$ эВ.

Из всех вышеперечисленных материалов практический интерес для использования в МЭД представляют только алмаз, карбид кремния и арсенид галлия. Остальные материалы представляют для МЭД больше научный, чем практический интерес из-за значительных технологических трудностей получения кристаллов достаточной площади, малой технологичности процессов формирования сенсорных элементов и структур (СЭС) и т.п. Поэтому в основном они используются в качестве источников и приемников оптических излучений.

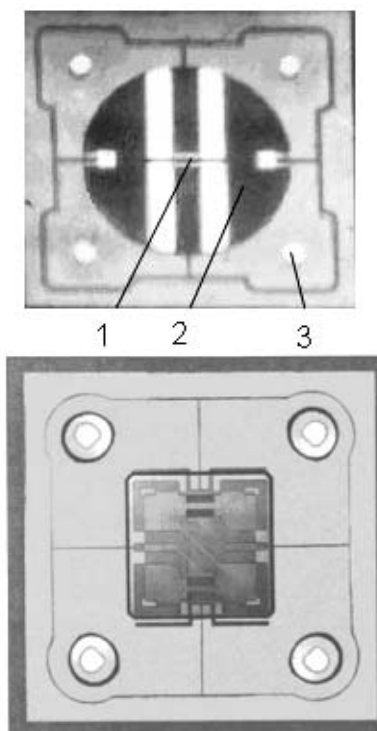


Рис. 2. ЧЭ на основе карбида кремния фирмы Kulite: 1 – пьезорезистор; 2 – упругий элемент; 3 – контактные столбики

Наиболее перспективным материалом для высокотемпературных и работающих в агрессивных условиях МЭД, несомненно, является синтетический алмаз. Но в настоящее время пока еще не получены алмазные пластины достаточной площади, да и сама технология получения даже небольших кристаллов остается очень сложной и дорогостоящей. Но благодаря таким свойствам, как высокая теплопроводность, термостабильность и стойкость практически к любым агрессивным средам и радиоактивным излучениям, возможно создание различных приборов с уникальными характеристиками, недостижимыми для аналогичных приборов, изготовленных из МК. В частности, радиационная стойкость алмаза к нейтронам в 100 раз выше, чем у МК, рабочая температура может достигать  $1000\div 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , рабочее напряжение до 1 кВ, а теплопроводность выше, чем у Si в 14 раз [6].

В последнее время ускоренно развивается направление синтеза тонких алмазных пленок на поверхности различных материалов, в том числе на кремнии и на металлах. Поликристаллические алмазные пленки получают методом газозольного осаждения различных углеродосодержащих газов (метана в смеси с водородом, ацетиленом, бензолом и ряда других). Активация процесса синтеза пленок осуществляется тлеющим или СВЧ-разрядами. Принципиально возможным способом модификации алмазных пленок является легирование их различными примесями, что позволяет создавать тонкопленочные активные и пассивные электронные приборы, а также ЧЭ на основе поликристаллических алмазных пленок. По мере совершенствования технологии легирования монокристаллического алмаза и поликристаллических пленок, нанесения на них контактной металлизации, профилирования пластин, а также получения пластин достаточной площади и приемлемой цены будут, несомненно, разрабатываться и МЭД на основе алмаза.

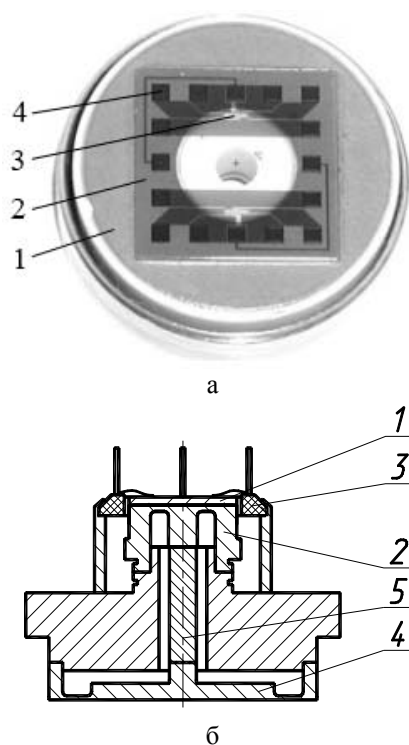


Рис. 3. Полупроводниковые ИМ на базе структур «КНС»: а – фирмы Minebea (1 – металлическая мембрана; 2 – сапфировая подложка; 3 – монокремниевые пьезорезисторы; 4 – металлизация); б – фирмы «Теплоприбор» (1 – ЧЭ (КНС); 2 – металлическая измерительная мембрана; 3 – контактная колодка; 4 – разделительная металлическая мембрана; 5 – шток)

По прогнозам еще одним перспективным функциональным материалом для высокотемпературных и радиационно-устойчивых МЭД, наряду с алмазом, является карбид кремния (SiC) [7, 8]. Значительная энергия связи между Si и C обеспечивает высокую термическую, радиационную и химическую стойкость как самому материалу, так и приборам на его основе. Карбид кремния имеет несколько основных (четыре) полиморфных (модификаций), различающихся строением кристаллической ячейки (а всего известных форм SiC более сотни).

Наиболее используемым в датчиках полиморфом является  $\beta$ SiC (или  $\beta$ -SiC). Из SiC изготавливают высокотемпературные (рабочая температура 600 °C и выше) термометры сопротивления, тензорезисторы, транзисторы и диоды. Как и для алмаза, для SiC традиционная кремниевая технология практически не пригодна, поэтому для него необходима разработка новых технологий формирования СЭ и СС. Так, для диффузии примесей используется ионная имплантация, а для формирования диэлектрических и проводящих пленок - газофазное осаждение и термовакуумное испарение и т.д. При этом в ограниченной мере возможно легирование и создание  $p$ - $n$ -переходов термодиффузией при высокой температуре и только при использовании диффузиантов бора и бериллия. Весьма перспективна – ионная имплантация ионами  $Al^+$ .

Одной из особенностей SiC является то, что из-за своей высокой твердости он способен обрабатываться только алмазом или карбидом бора, но при этом на его поверхности возникают микротрещины, которые могут быть удалены химическим или плазмохимическим травлением во фторсодержащей кислородной плазме.

Химическое травление проводится или в газовой смеси хлор – кислород при температуре свыше 1000 °С либо в расплавах щелочей при температуре свыше 400 °С. В отличие от кремния SiC в любых щелочных и кислотных травителях не травится. Очевидными недостатками, ограничивающими использование SiC в МЭД, являются недостаточная отработанность технологических процессов формирования микроструктур, дороговизна и сложность получения монокристаллического SiC. Несмотря на указанные недостатки, SiC является перспективным материалом для МЭД, которые работают в экстремальных условиях. Поэтому по мере отработки технологии он будет все больше использоваться в качестве функционального материала для МЭД. В настоящее время за рубежом в направлении исследования и применения SiC в ЧЭ высокотемпературных МЭД усиленно занимается фирма *Kulite Semiconductor Products, Inc.* (США), в России параллельные исследования проводит НТЦ МИЭТ, г. Зеленоград, но у них, в отличие от *Kulite*, результаты исследований не воплощены в ЧЭ МЭД [9, 10].

Альтернативой указанным материалам могут быть структуры на основе кремния типа КНД (кремний на диэлектрике) и КНИ (кремний на изоляторе). Дело в том, что максимальная рабочая температура МК, как силового материала, при которой ухудшаются его ЭФХ, составляет (600–700) °С (температура плавления кремния 1412 °С). Кратко рассмотрим достоинства и недостатки указанных структур, применительно к ЧЭ датчиков [11, 12].

**Структуры «Кремний на сапфире».** Основным материалом из группы КНД, который наиболее широко используется в МЭД, особенно в России, является кремний на сапфире (КНС), в которых слой кремния легируется необходимой примесью как изначально (при газофазной эпитаксии), так и в процессе формирования СЭ ЧЭ (термодиффузией или ионной имплантацией). Выбирая необходимый уровень легирования и соответствующую примесь, получают высоколегированные (низкоомные) и низколегированные (высокоомные) области. Для тензоструктур используют, как правило, высоколегированные структуры, которые имеют минимальный температурный коэффициент сопротивления (ТКС) и эффект автокомпенсации. Структуры КНС являются основой для изготовления ЧЭ МЭД механических параметров. Достоинствами КНС структур являются:

- ◆ высокая температура эксплуатации, вплоть до 300–350 °С без охлаждения;
- ◆ возможность достижения при определенных уровнях легирования кремниевой пленки эффекта самокомпенсации температурных погрешностей (ТКС = температурному коэффициенту чувствительности (ТКЧ) при питании стабилизированным током);
- ◆ стойкость к агрессивным средам и радиации.

ЧЭ на основе КНС, по сравнению с монокремнием, имеют дополнительные преимущества, ибо сапфир прочнее и жестче кремния и в принципе позволяет работать с большим уровнем деформаций, чем в интегральных ПЧЭ; сапфир обладает отличными упругими и изолирующими свойствами вплоть до температур порядка 1000° С, что делает ЧЭ на основе КНС работоспособными при высоких температурах (до начала пластических деформаций в кремнии, т. е. приблизительно до 700° С); сапфир химически и радиационно исключительно стоек, поэтому интегральные схемы на основе КНС могут работать в условиях высокой радиации; наконец, в ЧЭ на основе КНС отсутствует *p-n* -переход, а следовательно, существенно упрощается технология их изготовления и увеличивается выход годных изделий. Такие ПЭ работоспособны в самых жестких условиях эксплуатации при широком интервале рабочих температур и обладают повышенной надежностью и стабильностью параметров [13].

Основными недостатками КНС-структур являются их дороговизна, практическая невозможность их профилирования и значительный уровень структурных напряжений в Si – пленке из-за значительной разницы в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) кремния и сапфира. Кроме того, у МЭД с чувствительными элементами (ЧЭ) на основе КНС присутствует нестабильность характеристик во времени из-за релаксационных процессов, происходящих в пленке Si в процессе эксплуатации датчика. Все эти недостатки сужают область применения таких МЭД, а также не позволяет выпускать их в массовом количестве по приемлемым ценам.

**КНК-структуры на основе поликристаллического кремния.** Значительный интерес для высокотемпературных МЭД представляет поликристаллический кремний (ПК), который, в отличие от МК-изотропен по своим физическим характеристикам (ФХ). Основным преимуществом ПК по сравнению с МК является возможность формирования из него ЧЭ, не содержащих *p-n*-переходы, что позволяет повысить рабочую температуру датчиков до 200...250 °С. Изменяя концентрацию легирующих примесей в ПК (модификация ПК) [14], можно получить практически нулевое значение ТКС резисторов. Проводимость ПК регулируется технологическими методами путем изменения дозы легирующей примеси, а также энергией легирующих ионов и температурой подложки. Таким образом, модифицируя ПК путем легирования различными примесями и дозами, термообработкой, рекристаллизацией и т.д., можно получить области и СЭС, имеющие значительную разницу в ФХ. На одной подложке можно сформировать, например тензо- и терморезисторы, фото- и магниточувствительные СЭС, проводящие шины, контактные группы, изолирующие области. Таким образом, элементом модификации ПК являются специальные технологические процессы и операции. Рассмотрим основные СЭС из ПК и технологии их модификации.

При легировании ПК пленок до концентрации  $10^{19} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$  их удельное сопротивление снижается до 0,01 Ом·см. Для сравнения: у Si марки КЭФ 4,5  $\rho=4,5$  Ом·см, а у пленки Al-Mn  $\rho=0,6 \cdot 10^{-3}$  Ом·см. Аморфная структура легированных ПК пленок дает возможность формировать из них коммутационные шины микронных и субмикронных размеров. После термообработки ПК-шин на них формируется пленка SiO<sub>2</sub> с высокими изоляционными свойствами, которая позволяет формировать второй слой коммутации. Недостаток ПК-шин – разница в ТКЛР с кремнием: у ПК  $\alpha=3,82 \cdot 10^{-6}$ , у МК  $\alpha=2,33 \cdot 10^{-6}$ , что не так существенно для интегральных схем, работающих в нормальных условиях, но критично для МЭД, эксплуатирующихся в широком диапазоне температур. Важным свойством ПК пленок является возможность модификации структуры с помощью лазерного излучения, при воздействии которого происходит рекристаллизация пленки (РПК-пленки) [15, 16].

Доказано, что наиболее перспективными, с точки зрения близости к ФХ МК, являются структуры РПК-SiO<sub>2</sub>-МК, в которых пленка РПК отделена от основного материала слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 0,1–0,2 мкм. Такая структура аналогична выше рассмотренной КНС-структуре, но, в отличие от последней, позволяет профилировать структуры с помощью щелочных или кислотных травителей, получая ПЧЭ на необходимый диапазон измерения. Рабочая температура МЭД с использованием ПК рекристаллизованного лазерным лучем, составляет 250...270 °С.

**Укрепленная технология изготовления поликремниевых ЧЭ на основе КДИ структур высокотемпературных МЭД.** На практике существует достаточно большое количество технологических процессов формирования элементов и структур ЧЭ и ИМ высокотемпературных датчиков давления, при этом их отличие связано с используемыми функциональными материалами [17]. На рис. 4 приведена одна из таких технологий.

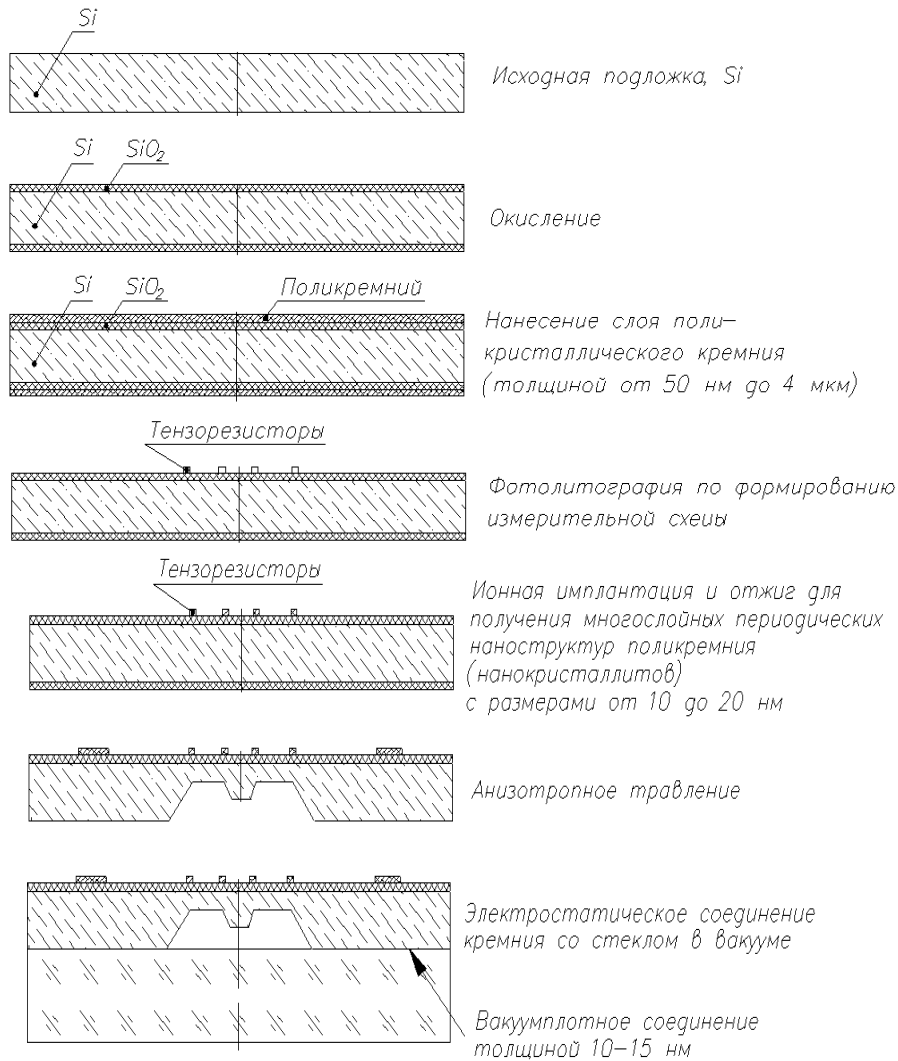


Рис. 4. Технология изготовления ЧЭ на основе КДИ-структур с поликремниевыми пьезорезисторами

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 51086-97 Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. Госстандарт России ИПК Издательство стандартов, 1997.
2. Михайлов П.Г., Богонин М.Б., Михайлов А.П. Материалы микроэлектронных датчиков // Новые промышленные технологии. – 2003. – № 3.
3. Kulite. Инновации и лидерство в производстве преобразователей [Электронный ресурс] / Двигатель, № 65, 2008. – С. 8. – Режим доступа: <http://engine.aviaport.ru/issues/65/page08.html>.
4. Михайлов П.Г., Соколов А.В., Сергеев Д.А. Вопросы применения чувствительных элементов и измерительных модулей в датчиках физических величин // Информационно-измерительная техника: Межвузовский сборник научных трудов. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2012. – Вып. 37.



5. Михайлов П.Г. Микроэлектронные датчики, особенности конструкций и характеристик // Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2004. – № 6. – С. 38-41.
6. Алмаз в электронной технике // Сборник статей под ред. В.Б. Кваскова. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. Водаков Ю.А., Остроумов А.Г. Карбид кремния – материал для твердотельной электроники // Измерение Контроль Автоматизация. – 1987. – № 2.
8. Корляков А.В., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Микроэлектромеханические структуры на основе композиции «карбид кремния–нитрид алюминия» // Микроэлектроника. – 1999. – Т. 28, № 3.
9. Каталог продукции Kulite ([www.kulite.com](http://www.kulite.com)).
10. Anthony D. Kurtz Ultra High Temperature, Miniature, SOI Sensors for Extreme Environments / Anthony D. Kurtz, Alexander A. Ned, Alan H. Epstein // IMAPS International HiTEC 2004 Conference Santa Fe, New Mexico, May 17-20, 2004.
11. Баринов И.Н. Результаты исследования высокотемпературных полупроводниковых чувствительных элементов датчиков давления на основе структуры «кремний-на-диэлектрике» // Компоненты и технологии. – 2008. – № 11. – С. 30-32.
12. Баринов И.Н. Полупроводниковый чувствительный элемент на основе структуры «кремний-на диэлектрике» для высокотемпературных датчиков давления // Датчики и системы. – 2004. – № 12.
13. Стучебников В. М., Суханов В.И. Хасиков В.В. Тензорезисторные чувствительные элементы на основе структур «кремний на сапфире» в преобразователях давления для высоких температур // Приборы и системы управления. – 1981. – № 3. – С. 23.
14. Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применение / Под ред. Г. Харбеке. – М.: Мир, 1989.
15. Михайлов П.Г. Модификация материалов микроэлектронных датчиков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 5.
16. Модификация и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными потоками / Под ред. Дж. Поути. – М.: Машиностроение, 1987.
17. Гридчин В.А., Драгунов В.П. Физика микросистем: Учеб. пособие в 2 ч. Ч. 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 416 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Е. Панич.

**Михайлов Петр Григорьевич** – Пензенский государственный технологический университет; e-mail: [petr.mixajlov.49@mail.ru](mailto:petr.mixajlov.49@mail.ru); 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11; тел.: 88412495441; кафедра ИТС; д.т.н.; профессор; ген. директор ООО НПЦ «КИТ» г. Пенза.

**Мокров Евгений Алексеевич** – e-mail: [kitem-12@mail.ru](mailto:kitem-12@mail.ru); кафедра приборостроения; д.т.н.; профессор; гл. конструктор ООО НПЦ «КИТ» г. Пенза.

**Сергеев Дмитрий Андреевич** – e-mail: [sergeeva\\_pgu@mail.ru](mailto:sergeeva_pgu@mail.ru); кафедра автоматики и телемеханики; аспирант.

**Скотников Валерий Владимирович** – e-mail: [sko\\_val@mail.ru](mailto:sko_val@mail.ru); кафедра приборостроения; аспирант.

**Петрин Владимир Алексеевич** – e-mail: [vlad.petrin@mail.ru](mailto:vlad.petrin@mail.ru); кафедра приборостроения; аспирант.

**Чернецов Михаил Андреевич** – e-mail: [sektor\\_forever@rambler.ru](mailto:sektor_forever@rambler.ru); тел.: 89875083807; аспирант.

**Mikhailov Peter Grigor'evich** – Penza State Technological University; e-mail: [petr.mixajlov.49@mail.ru](mailto:petr.mixajlov.49@mail.ru); Baydukova travel / 1a/11, Gagarin street, Penza, 440039, Russia; phone: +78412495441; the department of ITS; dr. of eng. sc.; professor; gen. Director of SPC "KIT" Penza.

**Mokrov Evgeni Alexeevich** – e-mail: [kitem-12@mail.ru](mailto:kitem-12@mail.ru); the department of instrumentation; dr. of eng. sc.; professor; ch. Designer NPTS "KIT" Penza.

**Sergeev Dmitri Andreevich** – e-mail: sergeeva\_pgu@mail.ru; the department of automation and remote control; postgraduate student.

**Skotnikov Valery Vladimirovich** – e-mail: sko\_val@mail.ru; the department of instrumentation; postgraduate student.

**Petrin Vladimir Alexeevich** – e-mail: vlad.petrin@mail.ru; the department of instrumentation; postgraduate student.

**Chernetcov Michael Andreevich** – e-mail: sektor\_forever@rambler.ru; phone: +79875083807; postgraduate student.

УДК 531.768

**А.Ю. Малыхин, А.В. Скрылёв, А.Е. Панич, С.Н. Свирская, Е.И. Кретьова,  
Е.С. Медведева**

### **ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ СВОЙСТВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ЦТС-19**

*Исследованы различные способы управления свойствами пьезокерамического материала на основе системы цирконата-титаната свинца – ЦТС-19. Рассмотрены различные варианты легирования состава с целью повышения диэлектрических и пьезоэлектрических свойств при сохранении рабочего температурного диапазона, и в качестве легирующей добавки выбраны катионы бария. Измерены и рассчитаны все электрические, пьезоэлектрические и упругие характеристики. Полученные данные позволяют провести компьютерное моделирование пьезоэлементов любой формы и размера, изготовленных из модифицированного материала для последующего применения в приборостроении. Проведены исследования в области стабильности полученного материала при циклическом воздействии повышенных температур. Построены графики зависимости относительной диэлектрической проницаемости и пьезомодуля  $d_{33}$  от максимальной температуры, достигаемой в процессе циклирования. Проведён сравнительный анализ свойств, получаемых на модифицированном материале с требованиями отраслевого стандарта к ЦТС-19. Новый материал обладает улучшенными свойствами по сравнению с ЦТС-19, а также стабильностью в температурном диапазоне до 200 °С.*

*Керамические каркасы; пьезофазы цирконата-титаната свинца; пьезокерамические материалы; энергосбережение; оптимизация свойств; система ЦТС; ЦТС-19.*

**A.Y. Malykhin, A.V. Skrylev, A.E. Panich, S.N. Svirskaya, E.I. Kretova,  
E.S. Medvedeva**

### **THE WAYS OF OPTIMIZATION PIEZOELECTRIC MATERIAL PZT-19**

*Different ways to control the properties of the piezoceramic material based on solid solution system of zirconate-titanate of lead – PZT-19 were explored. Various embodiments of doping to improve the dielectric and piezoelectric properties while maintaining the operating temperature and as a dopant selected barium cations. Measured and calculated all electrical, piezoelectric and elastic characteristics. The data obtained allow a computer simulation of piezoelectric elements of any shape and size, made of modified material for subsequent application in instrument. Conducted research on the stability of the resulting material under cyclic exposure to elevated temperatures. The graphs of the relative permittivity and the piezoelectric coefficient  $d_{33}$  of the maximum temperature reached during cycling. A comparative analysis of the properties obtained on a modified material with the requirements of the industry standard for PZT-19. The new material has improved properties in comparison with PZT-19, and the stability in the temperature range up to 200 °C.*

*Ceramic frames; piezophase zirconate-titanate lead; piezoceramic substances; an energy conservation; optimisation of properties; system PZT; PZT-19.*