

УДК 681.586'325'773

Ф. А. Абдуллин, В. Е. Пауткин**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
КРЕМНИЕВЫХ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ
С РАСШИРЕННЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ
ДИАПАЗОНОМ ИЗМЕРЕНИЙ****F. A. Abdullin, V. E. Pautkin****TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FORMATION
OF SILICON PIEZORESISTIVE ACCELEROMETERS
WITH EXTENDED TEMPERATURE RANGE OF MEASURES**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрены кремниевые пьезорезистивные МЭМС-акселерометры, их достоинства и недостатки. Объектом исследования являются конструкции чувствительных элементов (ЧЭ) пьезорезистивных микромеханических датчиков. Целью работы является анализ технологических особенностей формирования ЧЭ кремниевых пьезорезистивных акселерометров. *Материалы и методы.* Использован системный подход к рассмотрению технологических особенностей и материалов при формировании ЧЭ пьезорезистивных акселерометров. *Результаты.* Предлагается применение в конструкциях ЧЭ новых материалов и структур, таких как карбид кремния и «кремний – диэлектрик – кремний», а также использование измерительной схемы из поликристаллического кремния. *Выводы.* Использование предложенных вариантов конструктивно-технологических решений позволит создавать микромеханические акселерометры с улучшенными выходными параметрами.

A b s t r a c t. *Background.* Considers silicon piezoresistive MEMS accelerometers, their advantages and disadvantages. The object of research is the design of sensing elements (SE) piezoresistive MEMS sensor. The aim of the work is the analysis of the technological features of formation of SE silicon piezoresistive accelerometers. *Materials and methods.* A systematic approach to the consideration of technological features and materials in the formation of piezoresistive accelerometers. *Results.* Provided the use in constructions SE new materials and structures, such as silicon carbide and «silicon-insulator-silicon» as well as the use of the measuring circuit from polysilicon. *Conclusions.* The use of the options proposed structural and technological solutions will create a micromechanical accelerometer with improved output parameters.

К л ю ч е в ы е с л о в а: микромеханический акселерометр, пьезорезистивный акселерометр, чувствительный элемент, монокремний, поликремний, технология МЭМС.

Key words: micromechanical accelerometer, piezoresistive accelerometer sensor, monocrystall silicon, polysilicon, MEMS technology.

Пьезорезистивные микромеханические акселерометры получили широкое распространение в промышленности благодаря возможности измерения линейных ускорений в широком частотном диапазоне, в том числе ударных ускорений, которые невозможно измерить с помощью другого класса акселерометров (пьезоэлектрических, емкостных и др.). Кремниевым пьезорезистивным акселерометрам, изготовленным по технологиям МЭМС (микроэлектромеха-

нические системы), свойственно одновременное получение множества кремниевых кристаллов чувствительных элементов с одинаковыми температурными характеристиками, что недосяжимо при изготовлении акселерометров, реализованных из дискретных элементов с индивидуальными температурными характеристиками [1].

Достоинствами кремниевых пьезорезистивных микромеханических акселерометров являются высокая механическая прочность, широкий частотный диапазон, возможность компенсации температурного дрейфа схемотехническими методами, а также характеристики чувствительного элемента, основанные на уникальных свойствах кремния: отсутствии гистерезиса подвижных микроструктур, долговременной стабильности, способности к многократным циклическим нагрузкам без накопления механической усталости. К технологическим преимуществам кремния можно отнести способность к легкому термическому окислению (создание защитных слоев при формировании чувствительных элементов), способность к управляемому формообразованию методами анизотропного и плазмохимического травления, возможность одновременного изготовления множества однотипных кристаллов чувствительных элементов и др.

Серьезным недостатком кремниевых пьезорезистивных акселерометров можно считать ограниченный температурный диапазон измерений, связанный с наличием в структуре кремниевого кристалла чувствительного элемента измерительной схемы (как правило, это мостовая схема Уитстона), выполненной диффузией или ионным легированием примеси в исходную кремниевую пластину (рис. 1). Получаемый при этом обратный смещенный p - n -переход имеет рабочий температурный диапазон до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, что определяет и температурный диапазон функционирования акселерометров. Методы температурной компенсации выходного сигнала при температурах, равных $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ или выше, становятся труднореализуемыми или невозможными. Кроме того, при повышенных температурах появляются значительные токи утечки, что ведет к некорректным измерениям и потере информационного сигнала [2, 3].

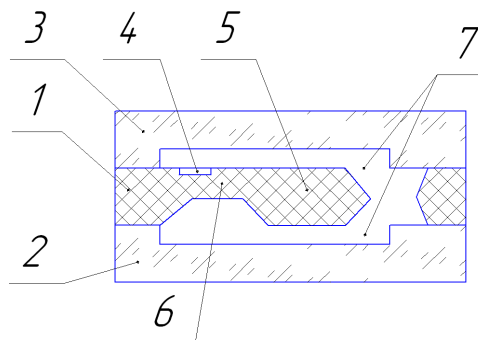


Рис. 1. Пьезорезистивный чувствительный элемент микромеханического акселерометра:

- 1 – кремниевый кристалл; 2, 3 – нижняя и верхняя стеклянные крышки – изоляторы;
- 4 – диффузионные пьезорезисторы; 5 – инерционная масса; 6 – упругая перемычка;
- 7 – зазоры в стеклах для перемещения инерционной массы

На практике существует необходимость измерения ускорений при повышенных температурах. Примером может служить измерение ударных нагрузок и вибрации двигательных установок, узлов оборудования и машин различного технологического назначения при их отработке и эксплуатации. Это требует наличия акселерометров, способных сохранять свои метрологические характеристики при воздействии повышенных температур, характерных при эксплуатации указанного оборудования, когда воздействующая температура может достигать значений выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пьезорезистивные акселерометры могут быть использованы для данного вида измерений только при условии применения высокотемпературного чувствительного элемента, работоспособного при температурах выше $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В последнее время разработчики обращают внимание на применение в конструкциях чувствительных элементов датчиков новых материалов и структур, способных к эксплуатации при повышенных температурах. Примерами таких материалов являются карбид кремния и структуры «кремний – диэлектрик – кремний» [4].

Структуры «кремний – диэлектрик – кремний»

Структура «кремний – диэлектрик – кремний» (КДК) представляет собой опорную пластину кремния, на которой поверх слоя диэлектрика (оксид кремния) нанесен приборный слой кремния толщиной до нескольких микрометров (рис. 2). На структурах КДК удастся получать приборы с улучшенными характеристиками по сравнению с аналогичными приборами, изготовленными на обычных кремниевых пластинах.

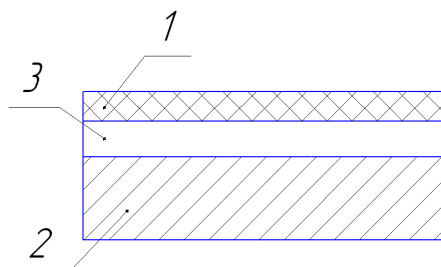


Рис. 2. Структура «кремний – диэлектрик – кремний»:

1 – верхний приборный слой кремния; 2 – кремниевая подложка; 3 – изолирующий слой оксида

Технологические процессы изготовления интегральных микросхем, адаптированные для структур МЭМС, могут стать наиболее подходящей основой для производства микромеханических приборов с улучшенными техническими характеристиками [5]. Замена изоляции *p-n*-переходом компонентов чувствительных элементов на полную диэлектрическую изоляцию позволяет улучшить такие характеристики датчиков, как радиационная и температурная устойчивость. Преимущество структур КДК перед структурами на основе объемного кремния заключено в надежной изоляции рабочего объема пьезорезистора от подложки. Примеры реализации чувствительных элементов акселерометров пьезорезистивного типа с использованием пластин КДК можно найти в ряде источников [6–8].

При всех положительных качествах структурам КДК свойственны следующие недостатки:

- при формировании измерительной схемы на основе приборного слоя методами фотолитографии и травления необходимо создать на поверхности приборного слоя защитный слой из оксида кремния. При этом приборный слой кремния имеет толщину до нескольких микрометров, и каждый процесс окисления при таких размерах будет существенно уменьшать толщину слоя [9], что может сказаться на электрических характеристиках формируемых элементов;
- кремниевые кристаллы чувствительных элементов акселерометров формируются двусторонним травлением пластин. При этом наличие в структуре пластин скрытого слоя диоксида кремния, несимметрично расположенного по отношению к планарной и непланарной стороне пластины, требует различного подхода к травлению с планарной и непланарной стороны, а именно: травление приборного слоя кремния – скрытого оксида – травление опорной пластины с планарной стороны, травление опорной пластины с непланарной стороны. Необходимо введение промежуточной операции травления скрытого слоя оксида кремния в технологический маршрут изготовления, что снижает его технологичность;
- отсутствие пластин КДК надлежащего качества на российском рынке является сдерживающим фактором развития высокотемпературных приборов в целом;
- при желании наладить собственное производство пластин КДК разработчики и технологи столкнутся с необходимостью наличия сложного специализированного дорогостоящего оборудования и необходимостью длительной отработки технологий формирования структур КДК.

Карбид кремния

Карбид кремния SiC имеет ширину запрещенной зоны 2,3–3,4 эВ, что значительно больше, чем у кремния, высокую электрическую прочность ($30 \cdot 10^5$ В/см), высокую теплопроводность (3,2–4,9 Вт/см·К). Благодаря этому карбид кремния становится незаменимым материалом при создании устройств, работоспособных в экстремальных условиях: повышенная температура, радиация, сильные электрические поля, высокие механические напряжения. Теоретически карбидокремниевые приборы могут достигать рабочего температурного диапазона до 1000 °С [10]. При этом карбид кремния имеет меньший коэффициент тензочувстви-

тельности по сравнению с объемным монокристаллическим кремнием (30 и 90 соответственно). Примеры реализации микромеханических пьезорезистивных акселерометров на основе карбида кремния представлены в работах [11, 12].

При использовании в качестве основного материала карбида кремния в производстве микромеханических акселерометров можно добиться значительного повышения температурного диапазона (до 600 °С), устранить паразитные токи утечки. При этом карбид кремния имеет следующие недостатки:

- коэффициент тензочувствительности карбида кремния практически в три раза меньше, чем у объемного монокристаллического кремния. Как следствие, нижний диапазон измерений приборов на карбиде кремния будет в три раза выше, чем у образцов, изготовленных из монокристаллического кремния;
- сложность ионного легирования карбида кремния до значений, оптимальных для построения измерительных схем и последующего термического отжига;
- сложность термического окисления поверхности карбида кремния для создания защитных масок при травлении и легировании;
- способность карбида кремния к травлению только методом глубокого реактивно-ионного травления подразумевает наличие сложного дорогостоящего оборудования в технологической производственной линейке;
- отсутствие приемлемых по качеству пластин карбида кремния на российском рынке также является сдерживающим фактором развития высокотемпературных приборов в целом.

Недостатки монокристаллического кремния, структур КДК и карбида кремния при формировании пьезорезистивных акселерометров диктуют необходимость нахождения компромиссных вариантов конструктивно-технологических решений чувствительных элементов, работоспособных при температурах выше 100 °С. Такие решения должны использовать положительные качества описанных выше материалов и структур: отличные упругие свойства кремния как конструкционного материала, возможность изоляции измерительной схемы от подложки, технологичность при изготовлении.

В технологии микромеханических приборов, таких как датчики давления, известны конструктивно-технологические решения формирования измерительной схемы из легированного поликристаллического кремния на окисленной кремниевой подложке [13]. В этом варианте пьезорезисторы мостовой схемы изолированы от подложки слоем двуоксида кремния, что позволяет повысить температурный диапазон измерений до +120 °С.

Данные конструктивно-технологические решения могут быть положены в основу разработки кремниевых микромеханических чувствительных элементов акселерометров пьезорезистивного типа с расширенным до + 120 °С температурным диапазоном измерений [14]. При этом требуется новый подход к разработке технологического маршрута изготовления, так как отличия в конструкции чувствительных элементов датчиков давления и акселерометров существенны, чувствительные элементы акселерометров имеют более сложную конструкцию (рис. 3).

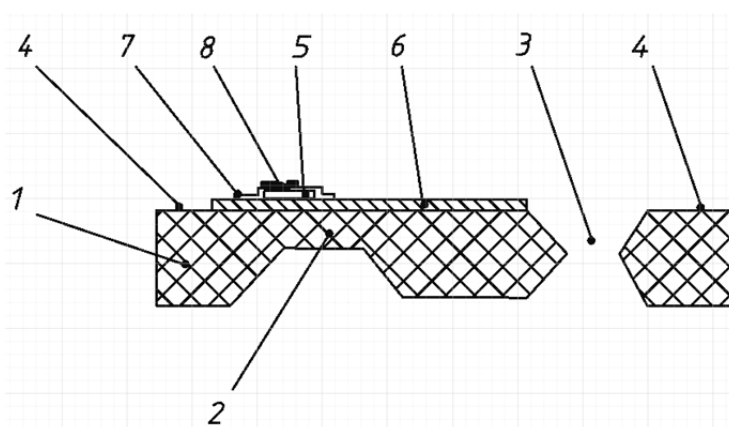


Рис. 3. Кристалл чувствительного элемента микромеханического акселерометра на основе поликремниевых пьезорезисторов: 1 – кремниевый кристалл; 2 – упругая перемычка; 3 – сквозное отверстие между инерционной массой и рамкой кристалла; 4 – области под электростатическое соединение кристалла со стеклянными деталями; 5 – поликремниевый пьезорезистор; 6 – слой термически выращенного оксида кремния на поверхности кремниевой пластины; 7 – защитный слой оксида кремния на поверхности пьезорезисторов; 8 – металлизация

Заключение

Очевидно, что чувствительность акселерометров на основе поликристаллического кремния будет ниже, чем при использовании монокремния, поэтому необходим поиск компромиссных вариантов конструктивно-технологических решений, позволяющих добиться оптимального соотношения между чувствительностью (что и определит диапазон измерения) и температурным диапазоном измерений.

Данная задача требует решения таких вопросов, как выбор технологии формообразования кристалла чувствительного элемента (анизотропное либо плазмохимическое травление кремния), геометрии упругой перемычки (профиля) и инерционной массы, выбор оптимального расположения пьезорезисторов на профиле кристалла, защита измерительной схемы при формообразовании кристалла, выбор метода разделения пластины на кристаллы и т.п.

Компромиссные варианты конструктивно-технологических решений позволят создать кремниевые пьезорезистивные чувствительные элементы с увеличенным до 120 °С температурным диапазоном измерений, технологичные при изготовлении, что в итоге позволит создавать микромеханические акселерометры с улучшенными выходными параметрами.

Список литературы

1. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Баринов, И. Н. Использование тензорезисторов меза-типа в датчиках давления для систем управления и контроля / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 9–15.
3. Волков, В. С. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 30–36.
4. Баринов, И. Н. Высокотемпературные тензорезистивные датчики давлений на основе карбида кремния. Состояние разработок и тенденции развития / И. Н. Баринов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 8. – С. 64–71.
5. Анализ преимуществ, перспектив применений и технологий производства структур КНИ : препринт ИТЭФ 27–00 / А. Л. Суворов, Ю. А. Чаплыгин, С. П. Тимошенко, Е. П. Прокопьев. – М., 2000. – 51 с.
6. Makoto Ishida. SOI sensors and epitaxial MEMS // J. Indian Inst. Sci. – 2001. – Nov. – Dec. – Vol. 81. – P. 619–626.
7. Расчет параметров тестовой структуры МЭМС-акселерометра, изготовленного с использованием КНИ-пластин / И. В. Годовицын, Д. А. Сайкин, Р. А. Федоров, В. В. Амеличев, П. П. Мальцев // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 12. – С. 39–45.
8. Chia-Pao Hsu. Implementation of a gap-closing differential capacitive sensing Z-axis accelerometer on an SOI wafer / Chia-Pao Hsu, Ming-Chuen Yip and Weileun Fang // J. Micromech. Microeng. – 2009. – Vol. 19. – P. 1–7.
9. Зи С. Физика полупроводниковых приборов : в 2-х кн. ; пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. / С. Зи. – М. : Мир, 1984. – Кн. 1. – 456 с.
10. Sadow, S. E. Advances in Silicon Carbide. Processing and Applications / Stephen E. Sadow, Anant Agarwal. – Artech House, Inc., 2004. – P. 435.
11. Voican, C. Design considerations 6H-SiC piezoresistive accelerometers / Cristiana Voican, Constantin D. Stanescu // Fascicle of Management and Technological Engineering. – 2007. – Vol. VI (XVI). – P. 792–796.
12. Nieva, P. M. New Trends on MEMS Sensor Technology for Harsh Environment Applications / Patricia M. Nieva // Sensors & Transducers Journal. – 2007. – Special Issue – October. – P. 10–20.
13. Патент 2504866 Российская Федерация, МПК H01L29/84. Интегральный тензопреобразователь ускорения / Пауткин В. Е. – № 2012122850/28 ; заявл. 01.06.2012 ; опубл. 20.01.2014, Бюл. № 2.

Абдуллин Фархад Анварович

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: farhad_58@mail.ru

Abdullin Farkhad Anvyarovich

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Пауткин Валерий Евгеньевич

кандидат технических наук,
главный специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Pautkin Valeriy Evgen'evich

candidate of technical sciences, chief specialist,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.586'325'773

Абдуллин, Ф. А.

Технологические особенности формирования кремниевых пьезорезистивных акселерометров с расширенным температурным диапазоном измерений / Ф. А. Абдуллин, В. Е. Пауткин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 118–123.