

Вопросы применения высокоустойчивых материалов в изделиях приборостроения

П. Г. Михайлов¹, А. П. Михайлов², Е. Д. Фадеев³, В. П. Сазонова⁴

¹ Пензенский технологический университет,
г. Пенза, Россия
pit_mix@mail.ru

² ООО «РВС», г. Москва, Россия

³ Пензенский государственный университет,
г. Пенза, Россия

⁴ Технологический университет, г. Королев, Россия

Аннотация. Статья посвящена актуальным вопросам современной науки и промышленности — увеличению функциональных возможностей в направлении расширения температурного диапазона, повышению радиационной устойчивости и метрологической надежности. Рассмотрены и проанализированы различные конструктивные и функциональные материалы, используемые в микроэлектромеханических системах (МЭМС) и электронных компонентах (ЭК) изделий приборостроения, в том числе датчиков физических величин (ДФВ). Особое внимание уделено группе широкозонных полупроводниковых материалов, двойных и тройных полупроводниковых соединений, которые, в отличие от традиционного микроэлектронного материала — монокристаллического кремния (МК), позволяют существенным образом повысить рабочую температуру и ресурс МЭМС и ЭК.

В качестве примеров использования высокотемпературных материалов приведены конструкции реальных МЭМС и ЭК: чувствительных элементов (ЧЭ) ДФВ, микроконденсаторов, индуктивностей, струн, двигателей.

Ключевые слова. Микроэлектромеханическая система, электронный компонент, датчик, приборостроение, высокотемпературный, широкозонный, полупроводник.

Application Issues of High-Stable Materials in the Products of Instrumentation

Petr G. Mikhailov¹, Alexey P. Mikhailov², Evgeniy D. Fadeev³, Vera P. Sazonova⁴

¹ Penza Technological University, Penza, Russia

pit_mix@mail.ru

² LLC PBC, Moscow, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

⁴ Technological University, Korolev, Russia

Abstract. The article is devoted to current issues of modern science and industry — expansion of functionality in the direction of expanding the temperature range, increasing radiation stability and metrological reliability. Various structural and functional materials used in microelectromechanical systems (MEMS) and electronic components (EC) of instrument engineering products, including physical quantity sensors (DPV), are considered and analyzed. Particular attention is paid to the group of wide-band semiconductor materials, double and triple semiconductor compounds, which, unlike the traditional microelectronic material — single-crystal silicon (МК), significantly increase the operating temperature and resource of MEMS and EC.

The main deterrents to the widespread use of these high-temperature materials in MEMS and EC are their complex technologies, which differ significantly from traditional silicon technology, as well as the high cost and low availability and small dimensions of the diamond working plates, silicon carbide aluminum nitride and so on. As an alternative to new single-crystal materials for MEMS and EC, it is suggested to use composite silicon-insulator-silicon semiconductor structures (CDC), for example, “silicon on sapphire” (CNS), as well as polycrystalline silicon (PC). There are also wide prospects for the use of diamond films formed during the gas-phase deposition of carbon-containing gases on various substrates.

As examples of the use of high-temperature materials, the constructions of real MEMS and EC are given: sensitive elements (FE) of DFV, micro capacitors, inductances, strings, motors.

Keywords. Microelectromechanical system, electronic component, sensor, instrumentation, high-temperature, wide-band, semiconductor.

© Mikhailov P. G., Mikhailov A. P., Fadeev E. D., Sazonova V. P., 2018

Введение

При создании изделий и комплектующих приборостроения, например МЭМС и электронных компонентов ЭК, которые предполагается использовать в экстремальных условиях эксплуатации: ядерных энергетических установках, нефтяных и газовых глубинных скважинах и проч., особое внимание уделяется выбору конструктивных и функциональных материалов [1, 2]. Примеры современных МЭМС и ЭК, используемых в приборостроении, приведены на рис. 1, 2 [3–7].

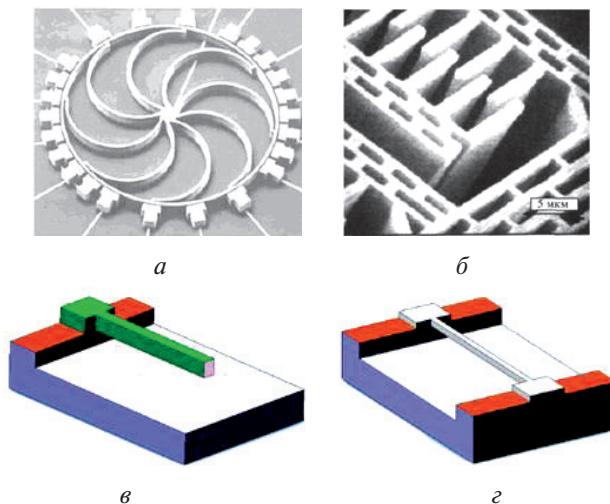


Рис. 1. Примеры конструкций МЭМС и ЭК, используемых в приборостроении: *a* — микромеханический гироскоп; *б* — гребенчатый переменный микроконденсатор; *в* — балочный чувствительный элемент (ЧЭ); *г* — струнный ЧЭ

Fig. 1. Examples of MEMS and EC designs used in instrumentation: *a* — micromechanical gyroscope; *b* — comb-shaped variable micro capacitor; *c* — beam sensing element (SE); *d* — string SE

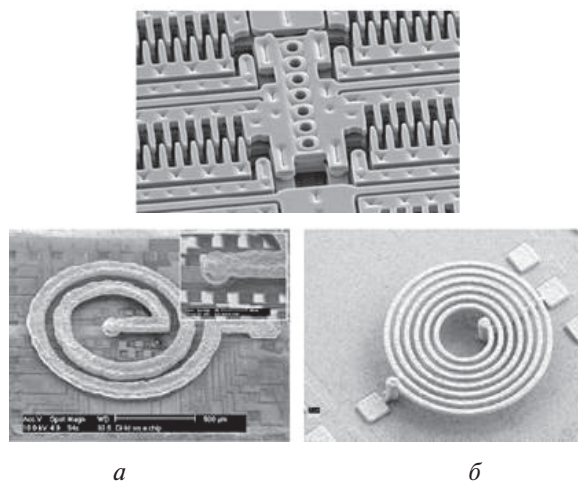


Рис. 2. МЭМС-исполнительные механизмы и ЭК: *a* — гребневой двигатель; *б* — плоские микрокатушки, подвешенные над подложкой

Fig. 2. MEMS actuators and EC: *a* — comb engine; *b* — flat micro-coils suspended above the substrate

Материалы МЭМС

Для современных изделий микроэлектроники характерно применение монокристаллического кремния (МК), который в наибольшей мере согласуется с существующими микроэлектронными технологиями. В то же время при использовании МК в изделиях специального приборостроения невозможно достичь требуемых технических характеристик изделия.

Это объясняется многими причинами, из которых основными являются:

- Недостаточная температурная стабильность МК, которая объясняется в основном его сравнительно узкой запрещенной зоной, составляющей 1,1 эВ при 300 °К, что не позволяет использовать МК при больших температурах и значительных уровнях электромагнитных и радиационных воздействий. Последнее объясняется тем, что энергии теплового возбуждения кристаллической решетки, а также энергии фотонов и элементарных частиц бывает вполне достаточно, чтобы инициировать переходы электронов и дырок через потенциальные барьеры в полупроводниковых структурах.
- Рост количества дефектов (термических, радиационных), порожденных термоударами, радиацией и механическими деформациями, приводит к деградации характеристик электронных компонентов и росту токов утечки.

Указанных явлений можно избежать или минимизировать их влияние, используя в качестве функционального материала широкозонные полупроводники и полупроводниковые соединения.

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

К другой группе относятся двойные и тройные полупроводниковые соединения [8, 9]:

- карбид кремния (β — политип) — β — 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 электронных компонентах (ЭК) представляют только алмаз, карбид кремния и арсенид галлия. Остальные материалы представляют для ЭК больше научный интерес из-за значительных технологических трудностей получения кристаллов достаточной площади, малой технологичности процессов формирования элементов

и структур. Поэтому в основном они используются в качестве источников и приемников оптических излучений.

Что касается арсенида галлия, имеющего кроме широкой запрещенной зоны еще и высокую подвижность дырок и электронов, позволяющих получать приборы с высокими граничными частотами и температурами, то следует отметить, что технология формирования GaAs-структур в значительной степени отличается от кремниевой: она более сложная, менее управляемая и дорогая. Кроме того, в отличие от МК, на поверхности GaAs невозможно создать самопассивирующие окисные пленки, а при термообработке он может выделять соединения мышьяка и галлия, которые являются даже в очень малых дозах чрезвычайно опасными для человека. Нейтрализация отходов, травителей и газов, получаемых в процессе проведения технологических процессов обработки GaAs, является весьма сложной задачей и пока не решена в должной мере на практике. Указанные технологические, организационные и иные технические трудности привели к тому, что в настоящее время GaAs используется исключительно для создания быстродействующих полупроводниковых приборов (СВЧ-диоды и транзисторы) и интегральных схем. Попытки создания МЭМС на основе GaAs ограничились пока лишь лабораторными образцами (рис. 3) [9].

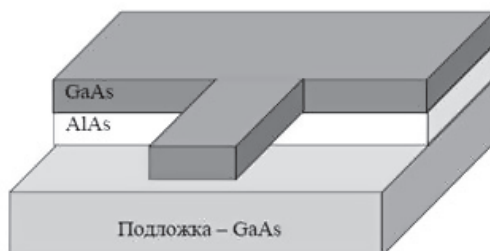


Рис. 3. Вид композитной МЭМС на основе широкозонных полупроводников, используемой для кантилевера

Fig. 3. Type of composite MEMS based on wide-band semiconductors used for cantilever

Перспективным материалом для высокотемпературных и работающих в агрессивных условиях датчиков является синтетический алмаз [10–13]. 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 ана-

логичных приборов, изготовленных из МК и GaAs. В частности, радиационная стойкость алмаза к нейтронам в 100 раз выше, чем у МК, рабочая температура может достигать 1000–1200 °С, рабочее напряжение до 1 кВ, а теплопроводность выше, чем у Si, в 14 раз [10]. Пример МЭМС прибора на основе синтетических алмазных материалов приведен на рис. 4.

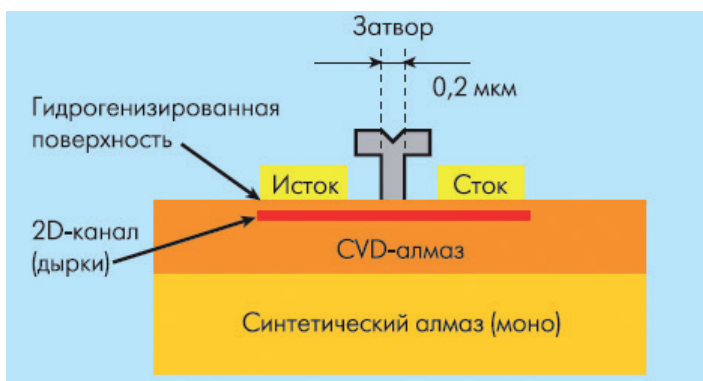


Рис. 4. Гетерогенная МЭМС детектора ионизирующего излучения на основе алмазных материалов

Fig. 4. Heterogeneous MEMS detector of ionizing radiation based on diamond materials

Основной трудностью проведения технологических операций и процессов на алмазе является его природная инертность, в том числе по отношению к термодиффузионным процессам. Поэтому для легирования кристаллов алмаза используется исключительно ионная имплантация пучками больших энергий (от 100 кэВ до 1 МэВ). Имплантация ионов He⁺, N⁺, O⁺, Ne⁺, Si⁺, Ni⁺, Cr⁺, Zn⁺, C⁺, B⁺ и др. позволяет создавать слои и области с *p*- и *n*-типами проводимости.

В последнее время ускоренно развивается направление синтеза тонких алмазных пленок на поверхности различных материалов, в том числе на кремнии и на металлах [11]. Поликристаллические алмазные пленки получают методом газофазного осаждения различных углеродосодержащих газов (метана в смеси с водородом, ацетилена, бензола и ряда других). Активация процесса синтеза пленок осуществляется тлеющим или СВЧ-разрядами. Принципиально возможным способом модификации алмазных пленок является легирование их различными примесями [12, 13], что позволяет создавать тонкопленочные активные и пассивные ЭП, а также сенсорные элементы 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 МЭМС на основе алмаза.

Еще одним перспективным функциональным материалом для высокотемпературных и радиационно-устойчивых датчиков является карбид кремния (SiC) [14]. 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) политипов (модификаций), различающихся строением кристаллической ячейки (а всего известных форм SiC более сотни). В наибольшей степени по развитию и применению SiC для МЭМС ЧЭ датчиков физических величин продвинулась американская фирма Kulite, которая использует разработанные ЧЭ и ИМ (рис. 5) во многих областях [15].

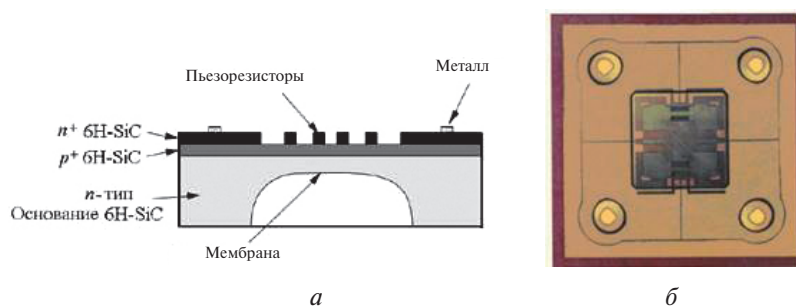


Рис. 5. Структура (а) и фотография (б) МЭМС ЧЭ датчиков давления на основе SiC

Fig. 5. Structure (a) and photograph (b) MEMS SE pressure sensors based on SiC

Следует отметить, что наиболее используемым в МЭМС ЧЭ политипом является 6H (или β -SiC). Из SiC изготавливают высокотемпературные (рабочая температура 600 °C и выше) ЭК: термометры сопротивления, тензорезисторы, транзисторы и диоды. Как и для алмаза, для SiC традиционная кремниевая технология практически непригодна, поэтому для него необходима разработка новых технологий формирования МЭМС и ЭК. Так, для диффузии примесей используется ионная имплантация, а для формирования диэлектрических и проводящих пленок — газофазное осаждение и термовакuumное испарение и т. д. [16, 17]. 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, 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 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, или в расплавах щелочей при температуре свыше $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. В отличие от кремния, SiC в любых щелочных и кислотных травителях не травится. Очевидными недостатками, ограничивающими использование SiC в МЭМС, являются недостаточная отработанность технологических процессов формирования микроструктур, дороговизна и сложность получения монокристаллического SiC. Несмотря на указанные недостатки, SiC является перспективным материалом для ЭК и МЭМС, которые работают в экстремальных условиях. Поэтому по мере отработки технологии он будет все больше использоваться в качестве функционального материала для МЭМС.

Альтернативными материалами для карбида кремния и алмаза могут быть структуры на основе кремния типа КНД (кремний на диэлектрике) и КНК (кремний на кремнии) [18] (рис. 6).

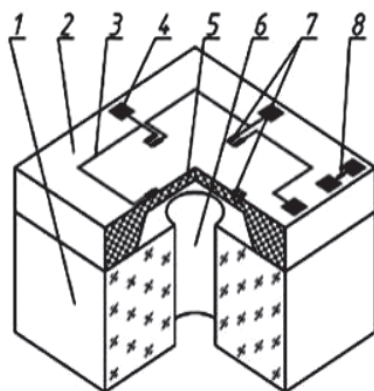


Рис. 6. Конструкция КНК МЭМС измерительного модуля: 1 — стеклянное основание, 2 — ЧЭ; 3, 4 — контактная металлизация, 5 — мембрана, 6 — отверстие для подвода давления, 7 — пьезорезисторы, 8 — датчик температуры

Fig. 6. Design of the SOS MEMS measuring module: 1 — glass base, 2 — SE; 3, 4 — contact metallization, 5 — membrane, 6 — opening for pressure, 7 — piezoresistors, 8 — temperature sensor

Дело в том, что максимальная рабочая температура МК, как силового материала, при которой ухудшаются его электрофизические характеристики (ЭФХ), составляет $600\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура плавления МК $1412\text{ }^{\circ}\text{C}$). При использовании же МК в качестве функционального материала, в котором формируются различные примесные структуры, рабочая температура становится еще меньше, что связано

с деградацией ЭФХ интегрированных на его поверхности и в объеме ЭК и МЭМС.

Основным материалом из группы КНД, который наиболее широко используется в ЭК и МЭМС, являются структуры кремния на сапфире (КНС), в которых слой кремния легируется необходимой примесью, как изначально (при газофазной эпитаксии), так и в процессе формирования ЭК (термодиффузией или ионной имплантацией) [19, 20]. 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 радиационно-стойких ЭК, чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков физических величин, МЭМС. Достоинствами структур КНС являются:

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

Рассмотрим характерные конструкции КНС МЭМС применительно к ДФВ — высокотемпературные ЧЭ и ИМ (рис. 7, 8).

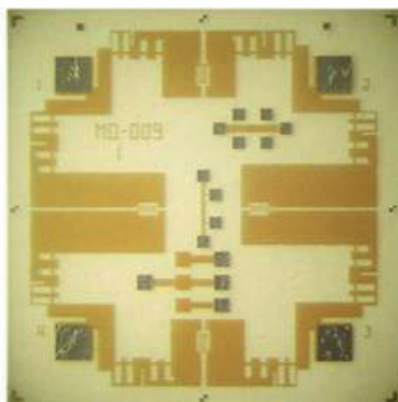


Рис. 7. Фотография ЧЭ со сформированной тензосхемой, элементами настройки и диагностики ЭФХ

Fig. 7. Photo of the SE with the formed strain gage, the elements of adjustment and diagnostics of the EPC

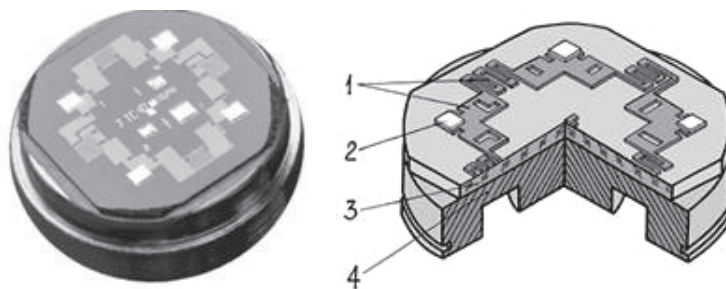


Рис. 8. Конструкция КНС измерительного модуля датчика давления:
 1 — тензорезистивный мост, 2 — контактные площадки,
 3 — КНС-пластина, 4 — титановая мембрана

Fig. 8. Design of the SOSIP measuring module of the pressure sensor:
 1 — strain-resistive bridge, 2 — contact pads, 3 — SOSIP plate,
 4 — titanium membrane

Основными недостатками КНС-структур являются их дороговизна, практическая невозможность их профилирования и значительный уровень структурных напряжений в Si-пленке из-за существенной разницы в температурных коэффициентах расширения (ТКР) кремния и сапфира. Кроме того, у ЭК и МЭМС на основе КНС присутствует нестабильность характеристик во времени из-за релаксационных процессов, происходящих в пленке Si в процессе эксплуатации приборов. Все эти недостатки сужают область применения ЭК и МЭМС, а также не позволяют выпускать их в массовом количестве по приемлемым ценам.

Поликристаллический кремний

Значительный интерес для высокотемпературных МЭМС и ЭК представляет поликристаллический кремний (ПК), который в отличие от МК изотропен по своим ЭФХ [21]. Изотропия ФХ ПК объясняется тем, что ориентация кристаллов (зерен) в объеме ПК произвольная, поэтому основные характеристики ПК определяются межзеренными границами (МЗГ) и объемным зарядом, образующимся в области МЗГ. Основным преимуществом ПК по сравнению с МК является возможность формирования из него ЧЭ, не содержащих *p-n*-переходов, что позволяет повысить рабочую температуру датчиков до 200–250 °C (рис. 9). Изменяя концентрацию легирующих примесей в ПК (модификация ПК) [22, 23], 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 элементы, имеющие значительную разницу

в электро-физических характеристиках. На одной подложке можно сформировать, например, тензо- и терморезисторы, фото- и магниточувствительные структуры, проводящие шины, контактные группы, изолирующие области [24, 25]. Рассмотрим основные технологические аспекты модификации элементов и структур на основе поликристаллического кремния.

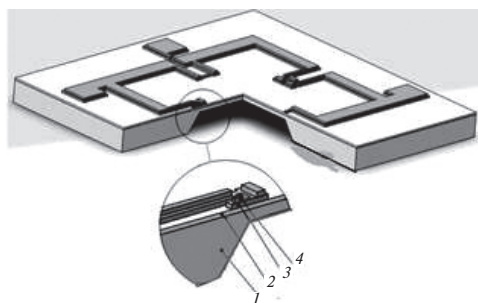


Рис. 9. Структура МЭМС на основе поликремниевой технологии:
1 — кремниевая подложка (МК); 2 — изоляционный слой (SiO_2);
3 — приборный слой (ПК); 4 — металлизация

Fig. 9. The structure of MEMS based on polysilicon technology:
1 — silicon substrate (MS), 2 — insulation layer (SiO_2), 3 — instrument layer (PS), 4 — metallization

Коммутационные шины для ЧЭ на основе ПК-пленок

При легировании ПК-пленок (ПКП) до концентраций 10^{19} – 10^{20} см^{-3} их удельное сопротивление снижается до $0,01$ $\text{Ом}\cdot\text{см}$. Для сравнения: у Si марки КЭФ 4,5 $\rho = 4,5$ $\text{Ом}\cdot\text{см}$, а у пленки Al–Mn $\rho = 0,6 \cdot 10^{-3}$ $\text{Ом}\cdot\text{см}$. Аморфная структура легированных ПКП дает возможность формировать на их основе коммутационные шины микронных и субмикронных размеров. После термообработки ПК-шин на них формируется пленка SiO_2 с высокими изоляционными свойствами, которая позволяет формировать второй слой коммутации. Недостаток коммутационных шин из ПКП — разница в ТКР 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 ВТДФВ, эксплуатирующихся в широком диапазоне температур. Важным свойством ПКП является возможность модификации структуры с помощью лазерного излучения, при воздействии которого происходит рекристаллизация пленки.

Структура ПКП в значительной мере зависит от вида легирующей примеси, температуры осаждения и термообработки пленки после формирования. ПКП, осаждаемые при температуре менее 575 $^{\circ}\text{C}$, аморфные по своей структуре, а осажденные при температуре более 625 $^{\circ}\text{C}$ становятся поликристаллическими и имеют столбчатую струк-

туру. Кристаллизация и рост зерен ПКП происходит при термоотжиге аморфного или столбчатого ПК. Важным процессом формирования высокотемпературных ВТДФВ на основе ПКП является перекристаллизация поликремния, которая происходит при нагреве структур. Доказано, что температура кристаллизации сильно зависит от легирующих примесей, которые вносятся в ПКП в процессе их газофазного осаждения. Изменяя состав и концентрацию примесей, можно управлять свойствами ПКП. Обнаружено, что примеси O_2 , N_2 , C стабилизируют аморфное состояние ПКП до $t_{отж} > 1000$ °С, а мышьяк обеспечивает устойчивую столбчатую структуру до 990 °С. ПКП, легированная фосфором до высоких концентраций и отожженная при 900–1000 °С в течение 20 мин, имеет средний размер зерна около 1 мкм.

Пьезорезистивный эффект в ПК ЧЭ

Для датчиков механических параметров, действие которых основано на пьезорезистивном эффекте, экспериментально измерены коэффициенты тензочувствительности для различных политипов кремния: монокристаллического (МК), поликристаллического (ПК) и рекристаллизованного лазерным лучом (РПК).

Так, для тензоструктур, легированных бором до концентраций 10^{20} см⁻³, значения продольного (π_l) и поперечного (π_t) пьезорезистивных коэффициентов составляют:

- π_l для МК = 60, для ПК = 30, для (РПК) = 40;
- π_t для МК = 60, для ПК = -4, для РПК = -6.

Фундаментальные пьезорезистивные коэффициенты для ПК, легированного бором до $1,8 \cdot 10^{20}$, составляют: $\pi_{11} = 11,8 \cdot 10^{-11}$ Па, $\pi_{12} =$ минус $6,7 \cdot 10^{-11}$ Па, $\pi_{44} = 18,6 \cdot 10^{-11}$ Па.

Для пленок ПК, легированных фосфором, тензорезисторы обладают только геометрическим тензоэффектом, а пьезорезистивная составляющая эффекта отсутствует.

Таким образом, наиболее перспективными с точки зрения близости к электрофизическим характеристикам МК являются структуры РПК-SiO₂-МК, в которых пленка РПК отделена от основного материала слоем SiO₂ 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 ЧЭ на необходимый диапазон измерения. Рабочая температура МЭМС и ЭК с использованием РПК составляет 250–270 °С. Достигнутая на практике тензочувствительность РПК-структур составляет от 70 до 80 % тензочувствительности МК. Используя в процессе лазерной рекристаллизации окисную маску, защищающую выбранные элементы от нагрева, можно получить гибридные структуры — РПК-ПК, поликремниевые элементы которых могут служить высокоомными резисторами, подгоночными элементами и термокомпенсационными элементами. Использо-

ние такой технологии позволяет изготовить полностью кремниевый высокотемпературный ДФВ, в котором силовые, функциональные и регулировочные элементы, а также защитные материалы (вплоть до корпуса) изготовлены из модификаций кремния (МК и ПК) и его соединений (SiO_2 , Si_3N_4). Такое конструктивно-технологическое решение приводит к резкому снижению тепловых деформаций благодаря идентичности тепловых характеристик применяемых материалов.

Технологии формирования поликремниевых элементов и структур МЭМС

В результате проведенных исследований были разработаны технологии формирования меза-ПК-тензорезисторов на монокристаллических кремниевых подложках из МК. При формировании структур ЧЭ были достигнуты следующие параметры:

- Удельное поверхностное сопротивление резисторов из поликремния $R_s = 30\text{--}100 \text{ Ом}/\square$.
- Номиналы поликремниевых тензорезисторов $R_{1-4} = 200\text{--}1000 \text{ Ом}$.
- Толщина мембраны в области деформаций $5\text{--}20 \text{ мкм}$.
- ТКС поликремниевых тензорезисторов $\approx 0,05 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

Фрагменты конструкции ЧЭ с поликремниевыми тензорезисторами представлены на рис. 10, а. Кроме того, была изготовлена подстроечная ПК-плата, которая содержала элементы, необходимые для подгонки тензосхемы (рис. 10, б).

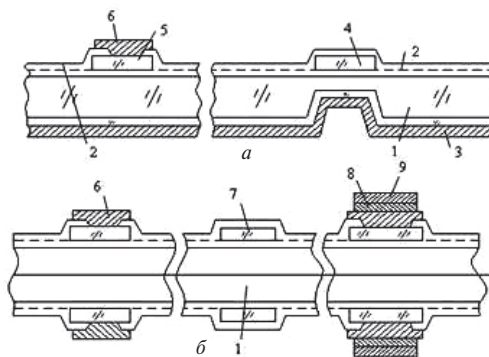


Рис. 10. Фрагменты конструкций ЧЭ (а) и настроечной платы (б), изготовленных с использованием поликремниевой технологии: 1 — подложка из МК; 2 — изолирующая пленка из SiO_2 ; 3 — Al-экран; 4 — ПК-тензорезистор; 5 — ПК-коммутационная шина; 6 — Al — контактная площадка; 7 — ПК-резистор; 8 — подслой ванадия; 9 — Ni — контактная площадка

Fig. 10. Fragments constructions of SE (a) and tuning board (b) structures manufactured using polysilicon technology: 1 — substrate from MS; 2 — insulating film of SiO_2 ; 3 — Al-screen; 4 — PS strain gage; 5 — PS switching bus; 6 — Al — contact area; 7 — PS resistor; 8 — sublayer of vanadium; 9 — Ni — contact pad

Проводились экспериментальные работы по модификации ПК пьезорезистивных структур с помощью ионного легирования при различных дозах и температурах разгонки примеси (рис. 11).

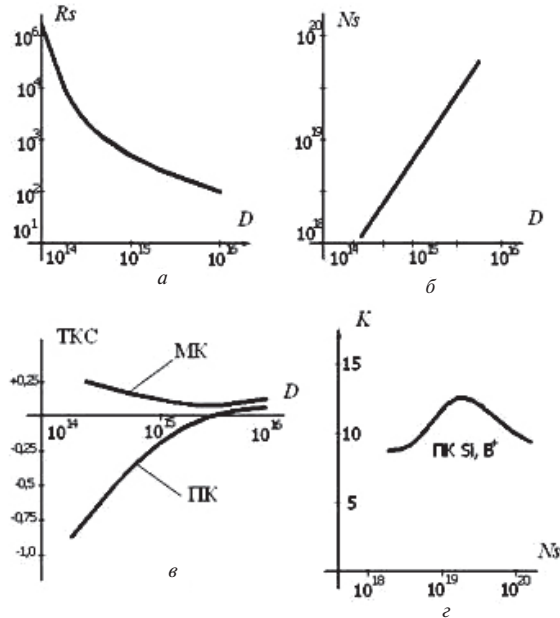


Рис. 11. Графики зависимостей основных электрофизических характеристик ($a - R_s$ [Ом/□]; $в - ТКС$ [%/K], $б - K$) поликремниевых пьезорезисторов от дозы легирования (D [см⁻²]) и концентрации (N_s [см⁻³]) внедряемой примеси

Fig. 11. Graphs of the dependences of the main electrophysical characteristics (ρ_s [Om/□], TCS [%/K], K,) of polysilicon piezoresistors on the dose of doping (D [cm⁻²]) and concentration (N_s [cm⁻³]) admixtures

Выводы

1. Перспективными материалами для высокотемпературных МЭМС и ЭК являются синтетический алмаз и карбид кремния, но их применение требует очень сложной технологии и дорогостоящего технологического оборудования.

2. В настоящее время наиболее востребованными являются высокотемпературные материалы на основе структур КНК, особенно КНС, пластины которых могут приобретаться с требуемыми ЭФХ.

3. Кроме того, большой спрос находят материалы на основе поликристаллического кремния, при этом ЭФХ поликремния можно изменять в широких пределах в процессе проведения технологических операций.

4. Факторами, управляющими ЭФХ ЭК на основе ПКП, являются доза легирования, мощность лазерного излучения и, в меньшей мере, температура подложки.

5. ПК-резисторы, имеющие защитную окисную пленку, имеют и большую стабильность, при этом оптимальная толщина пленки лежит в диапазоне 0,1–0,2 мкм.

6. Варьируя дозу легирования, можно изменять ТКС ПКП и резисторов на их основе, от отрицательных до практически нулевых значений.

7. При увеличении дозы легирования одновременно с уменьшением ТКС уменьшается удельное поверхностное сопротивление пленки.

8. На одном ЧЭ, изменяя дозу легирования, можно формировать термо- и тензоэлементы, что позволяет получать многофункциональные датчики.

Литература/References

1. Соколов Л. В. Основы исследования и разработки в области сенсорных МЭМС-устройств // Датчики и системы. 1999 № 3.

Sokolov L. V. Fundamentals of research and development in the field of sensor MEMS devices. *Sensors and Systems*, 1999, № 3. (In Russian)

2. Михайлов П. Г., Богонин М. Б., Михайлов А. П. Материалы микроэлектронных датчиков // Новые промышленные технологии. 2003. № 3.

Mikhailov P. G., Bogonin M. B., Mikhailov A. P. Materials of microelectronic sensors. *New industrial technologies*, 2003, № 3. (In Russian)

3. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / под ред. П. П. Мальцева. М. : Техносфера, 2005. 592 с.

Nano- i mikrosistemnaya tehnika. Ot issledovaniy k razrabotkam [Nano- and microsystem technology. From research to development]. Edited by P. P. Maltsev. Moscow, Technosphere, 2005, 592 p. (In Russian)

4. Варадан В., Виной К., Джозе К.. ВЧ МЭМС и их применение. М. : Техносфера, 2004. 528 с.

Varadan V., Vina K., Joseph K. *VCh I ih primenenie* [HF MEMS and their application]. Moscow, Tehnosfera, 2004, 528 p. (In Russian)

5. Михайлов П. Г., Омаров А. Д., Султангазинов С. К. Применение высокотемпературных датчиков физических величин на основе широкозонных полупроводников // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 2–4. С. 471–474.

Mikhailov P. G., Omarov A. D., Sultangazinov S. K. Primenenie vysokotemperaturnykh datchikov fizicheskikh velichin na osnove shirokazonnykh poluprovodnikov [Application of high-temperature sensors of physical quantities based on wide-gap semiconductors]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2016, No. 2–4, pp. 471–474. (In Russian)

6. Лысенко И. Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2005. 103 с.

Lysenko I. E. *Proektirovanie sensoryh i aktjuatornyh jelementov mikro-sistemnoj tehniki* [Designing sensory and actuating elements of microsystem technology. Taganrog: Publishing House TRSTU], 2005, 103 pp.

7. NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III, 2005–2009 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nexus-mems.com> (дата обращения: 05.07.2018).

NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III, 2005–2009. Available at: <http://www.nexus-mems.com> (accessed 05.07.18).

8. *Advanced micro & nanosystems*. Vol. 2 CMOS-MEMS. Edited by H. Baltes, O. Brand, G. K. Fedder, C. Hierold, J. Korvink, O. Tabata. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG. KGaA, Weinheim.

9. Васильев А. Г., Колковкий Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ-приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. М. : Техносфера. 2011. С. 53–65; 186–199.

Vasiliev A. G., Kolkovky Yu. V., Kontsevoy Yu. A. *SVCh pribory i ustrojstva na shirokozonnnyh poluprovodnikah* [Microwave devices and devices on wide-gap semiconductors]. Moscow, Technosphere, 2011, pp. 53–65; 186–199. (In Russian)

10. Хмельницкий Р. А., Талипов Н. Х., Чучева Г. В. Синтетический алмаз для электроники и оптики. М. : Издательство ИКАР, 2017. 228 с.

Khmelnitsky R.A, Talipov N.Kh., Chucheva G. V. *Sinteticheskij almaz dlja jelektroniki i optiki* [Synthetic diamond for electronics and optics]. Moscow, IKAR, 2017, 228 p. (In Russian)

11. Ральченко В., Конов В. CVD-алмазы. Применение в электронике // Электроника: наука, технология, бизнес (4/2007). С. 58–67.

Ralchenko V., Konov V. CVD-almazy. Primenenie v jelektronike [CVD diamonds. Application in electronics]. *Jelektronika: Nauka, Tehnologija, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2007, no. 4, pp. 58–67. (In Russian)

12. Achard J., Tallaire A., et al. Evaluation of freestanding boron-doped diamond grown by chemical vapour deposition as substrates for vertical power electronic devices. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, pp. 122109.

13. *Optical engineering of diamond*. Ed. Mildren R. P., Rabeau J. R. Wiley-VCH Verlag & Co. Weinheim. Germany, 2013.

14. Баринов И. Н. Высокотемпературные тензорезистивные датчики давлений на основе карбида кремния. Состояние разработок и тенденции развития // Журнал «Компоненты и технологии». 2010. № 8. С. 64–71.

Barinov I. N. Vysokotemperaturnye tenzorezistivnye datchiki davlenij na osnove karbida kremnija. Sostojanie razrabotok i tendencii razvitija [High-temperature strain gage pressure sensors based on silicon carbide. State of development and trends of development] // *Zhurnal Komponenty i tehnologii*

[Journal of Components and Technologies], no. 8, 2010, pp. 64–71. (In Russian)

15. Ned A. A., Kurtz A. D., Beheim G., Masheeb F., Stefanescu S. *Improved SiC Leadless Pressure Sensors for High Temperature, Low and High Pressure Applications*. Twenty-First Transducer Workshop Lexington, Maryland, 2004.

16. Модификация и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными потоками / под ред. Дж. Поути. М. : Машиностроение, 1987.

Modifikacija i legirovanie poverhnosti lazernymi, ionnymi i jelektronnymi potokami [Modification and doping of the surface by laser, ion and electron fluxes]. Ed. J. Pouty. Moscow, Mashinostroenie, 1987. (In Russian)

17. Михайлов П. Г. Модификация материалов микроэлектронных датчиков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003. № 5.

Mikhailov P. G. Modifikacija materialov mikrojelektronnyh datchikov [Modification of materials of microelectronic sensors]. *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika* [Instruments and Systems. Management, Control, Diagnostics], 2003, № 5. (In Russian)

18. Баринов И. Н. Полупроводниковые тензорезистивные датчики давления на основе КНД-структуры // Компоненты и технологии. 2009. № 5. С. 12–15.

Barinov I. N. Poluprovodnikovye tenzorezistivnye datchiki davlenija na osnove KND-struktury [Semiconductor strain gage pressure sensors based on the CCD structure]. *Komponenty i tehnologii* [Components and Technologies], 2009, no. 5, pp. 12–15. (In Russian)

19. Стучебников В. М. Измерение давления высокотемпературных сред // Тезисы докладов IX Международного научно-технического семинара. СПб. : ВНИИМ, 2004. С. 54–56.

Stuchebnikov V. M. Izmerenie davlenija vysokotemperaturnyh sred [Measurement of high-temperature media pressure]. *Tezisy dokladov IX Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminar* [Abstracts of the IX International Scientific and Technical Seminar]. Saint Petersburg, VNIIM, 2004, pp. 54–56. (In Russian)

20. Микроэлектронные датчики давления и устройства. Разработка и производство : сайт фирмы ПГ МИДА [Электронный ресурс]. URL: <http://midaus.com/rus/transmitters.htm> (дата обращения: 05.07.2018).

Mikrojelektronnye datchiki davlenija i ustrojstva. Razrabotka i proizvodstvo [Microelectronic pressure sensors and devices. Development and production]. Available at: <http://midaus.com/rus/transmitters.htm> (accessed 05.07.18). (In Russian)

21. Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применение / под ред. Г. Харбеке. М. : Мир, 1989.

Polikristallicheskie poluprovodniki. Fizicheskie svoystva i primenenie [Polycrystalline semiconductors. Physical properties and application]. Ed. G. Narbeke. Moscow, Mir, 1989. (In Russian)

22. Годовицын И. В., Шелепин Н. А., Лыженкова Г. А. Формирование поверхностных микромеханических структур из пленок поликремния // Известия вузов. Электроника. 1997. № 2. С. 49–54.

Godovitsyn I. V., Shelepin N. A., Lizhenkova G. A. Formirovanie poverhnostnykh mikromekhanicheskikh struktur iz plenok polikremniya [The formation of surface micromechanical structures from polysilicon films]. *Izvestiya Vuzov. Electronics*, 1997, № 2, pp. 49–54. (In Russian)

23. Mikhailov P. G., Slesarev Yu. N., Chulkov V. A. Mathematical Modeling of Combined Sensor Information — Measuring Systems // *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 20, pp. 10332–10337.

24. Михайлов П. Г., Сергеев Д. А., Соколов А. В. Управление свойствами функциональных материалов высокотемпературных датчиков // Сб. тр. МНПК «Инновационные технологии в машиностроительном комплексе». Пенза : Изд-во ПГУЗ, 2012. С. 292–294.

Mikhailov P. G., Sergeev D. A., Sokolov A. V. Upravlenie svoystvami funktsional'nykh materialov vysokotemperaturnykh datchikov [Control of the properties of functional materials of high-temperature sensors]. *Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroitel'nom komplekse* [Innovative technologies in the machine-building complex], Penza, 2012, pp. 292–294. (In Russian)

25. Вопросы создания высокотемпературных датчиков механических величин. Материалы. Конструкции. Технологии // П. Г. Михайлов, Е. А. Мокров [и др.] // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 4. С. 61–70.

Mikhailov P. G., Mokrov E. A., et al. Voprosy sozdaniya vysokotemperaturnykh datchikov mekhanicheskikh velichin [The problems of creating high-temperature sensors of mechanical quantities. Materials. Constructions. Technologies]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measure. Monitoring. Control. Management], 2013, no. 4, pp. 61–70. (In Russian)

Информация об авторах

Михайлов Петр Григорьевич — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Пензенского технологического университета, г. Пенза.

Михайлов Алексей Петрович — инженер, ведущий специалист ООО «РВС», г. Москва.

Фадеев Евгений Дмитриевич — студент 2 курса факультета вычислительной техники Пензенского государственного университета, г. Пенза

Сазонова Вера Петровна — методист Технологического университета, г. Королев, Московская обл.

Information about the authors

Mikhailov Petr Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher of the Penza Technological University, Penza.

Mikhailov Alexey Petrovich, engineer, leading specialist of LLC RVS, Moscow.

Fadeev Evgeniy Dmitrievich, 2nd year student of the Faculty of Computer Science of Penza State University, Penza.

Sazonova Vera Petrovna — methodologist of the Technological University, Korolev, Moscow Region.

Поступила / Receiver: 30.03.2018

Принята в печать / Accepted: 14.07.2018