

Высокотемпературные тензорезистивные датчики давлений на основе карбида кремния. Состояние разработок и тенденции развития

Илья БАРИНОВ,
к. т. н.
mzungu@inbox.ru

Представлены состояние разработок, тенденции развития, а также конструктивно-технологические проблемы создания высокотемпературных тензорезистивных датчиков давлений на основе карбида кремния.

Для реализации задач создания высокоэффективных информационно-измерительных систем (ИИС) управления и контроля авиационной и ракетно-космической техники требуется создание широкой номенклатуры датчиковой аппаратуры с высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками. Значительные отличия технических требований к датчиковой аппаратуре авиационных и ракетно-космических систем, особенно систем многоразового использования, привели к тому, что начиная с 1980-х годов более 90% датчиковой аппаратуры было разработано вновь, при этом понадобилось резко изменить традиционные подходы к конструированию и технологии изготовления датчиковой аппаратуры.

При внешней простоте и миниатюрности датчик — это сложнейшее физическое устройство. Кроме экстремальных условий работы (широких диапазонов температур, больших температурных перепадов, вибраций, акустических шумов, линейных ускорений, механических и гидравлических ударов и т. п.), датчик должен иметь механическую прочность выше механической прочности в том месте, где он установлен, поскольку для выявления предельных нагрузок

в экстремальной ситуации датчик должен обладать большим ресурсом, чем конструкция. Датчик должен отличаться минимальными массой и электропотреблением, что естественно, так как при тех количествах, в которых используются сегодня датчики на изделиях, они не должны ухудшать тактико-технические характеристики самих изделий. И при всех указанных условиях датчик является средством измерения с гарантированными точностными характеристиками на протяжении всего срока службы, который сейчас исчисляется годами, а в ближайшее время составит десятки лет.

Функционально датчик играет роль основного информативного элемента о контролируемом или измеряемом физическом параметре. На объекте он подвергается одновременному воздействию большого количества дестабилизирующих факторов, которые, если не принять определенных мер, искажают истинную информацию о поведении объекта.

Основные дестабилизирующие факторы (температура и вибрация) на изделиях авиационной и ракетно-космической техники в 3–5 раз превышают соответствующие значения на изделиях других отраслей (рис. 1) [1].

Такие же соотношения характерны и для остальных дестабилизирующих факторов (давление, акустические шумы, термоудары и др.) [2].

Современные авиационные и ракетные воздушно-газотурбинные и жидкостно-реактивные двигатели в целом являются отработанными и совершенными механизмами, поскольку они были объектами интенсивного развития и модернизации со стороны как отечественных, так и зарубежных производителей на протяжении более полувека для военного и авиационно-космического применений. Вследствие этого резко возросла стоимость и трудоемкость их дальнейшего усовершенствования. Добиться значительного улучшения характеристик двигателя (КПД, удельного расхода топлива, массы, габаритных размеров, выбросов, стоимости и др.) можно, основываясь на более глубоком изучении режимов его работы на установившемся, переходном и аэродинамическом режимах. Важнейшим параметром, подлежащим измерению в двигателях, является давление. Изучение и понимание таких процессов, как пульсация и срыв потока в компрессоре, устойчивость сгорания и низкий уровень выбросов систем сгорания, шум в системах перегрева оборудования, изменение давления в камере сгорания и цилиндрах, системах впрыска топлива и выхлопа и т. д., напрямую связаны с наличием постоянных данных о давлении, снимаемых с высокотемпературных датчиков давлений (ВДД). К датчикам давлений,

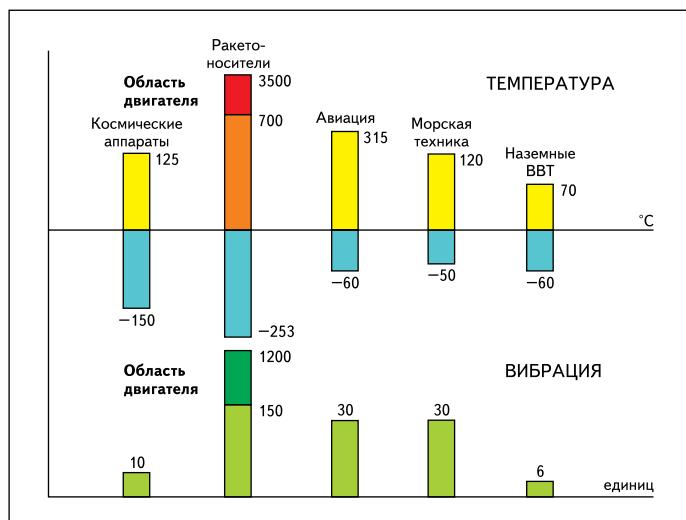


Рис. 1. Влияние дестабилизирующих факторов (температуры и вибрации) в различных отраслях

устанавливаемым на авиационных и ракетно-космических двигателях, подвергающихся на различных этапах отработки и эксплуатации воздействию температур до 600...900 °С, ионизирующих излучений и жестких электромагнитных помех, предъявляются высокие метрологические и эксплуатационные требования [2, 6].

Высокотемпературные измерения давлений в авиационной и ракетно-космической технике необходимы в газогенераторе, газопроводах, турбонасосном агрегате и других частях двигателя, где температура достигает значений 600 °С и более. Также существует задача измерения пульсаций давления в камере сгорания, с обеспечением непрерывного контроля процесса сгорания топлива с целью управления этим процессом для повышения экономичности и минимизации вредных выбросов [3]. При этом датчики могут находиться в химически агрессивной среде, состоящей из таких веществ, как кислород, углеводород/водород в топливе, каталитические соединения NO_x и SO_x , образующиеся при горении топлива.

Например, исследовательский центр NASA Glenn (США) ведет программу по разработке и созданию «интеллектуального» авиадвигателя, удовлетворяющего все возрастающие требования по сокращению выбросов, снижению расхода топлива и повышению безопасности. Данная программа включает в себя разработку ВДД, способных длительно эксплуатироваться при температуре до 600 °С [4]. Также эта организация в рамках программы по разработке усиленных сверхминиатюрных телеметрических и датчиковых систем (HSTSS), финансируемой Министерством обороны США и Управлением перспективных исследовательских программ (DARPA), работает над созданием ИИС для измерения физических явлений, связанных с запуском оружейных снарядов как элементов нового класса интеллектуальных боеприпасов [4, 5]. В этом случае датчики давлений, являясь непременным атрибутом таких ИИС, будут испытывать не только жесткие условия, характерные для первоначального удара и вибрации при выстреле, но и предельные значения высокой температуры, высоких давлений и больших электромагнитных полей, связанных с пусковыми механизмами.

Кроме контроля параметров авиационных и ракетно-космических двигателей, существует задача регулировки, обработки и протоколирования теплотехнических параметров дизельных двигателей и двигателей внутреннего сгорания путем измерения давления сгорания топлива в цилиндре двигателя (рис. 2) [7].

Это позволит осуществлять оперативный контроль рабочего процесса двигателей, проводить регулировку двигателя с оценкой тепловых параметров во всех цилиндрах, своевременно выявлять возникающие неисправности, устранять межцилиндровую и межцикловую нестабильности, накапливать информацию в базе данных для последующей оценки изменения технического состояния двигателя. На основании полученных данных можно обеспечить идентификацию неисправности деталей топливной аппаратуры, выявить нарушение фаз топливоподачи, износ поршневых колец и втулки цилиндра, прогар выпускных клапанов, а также неисправность турбокомпрессора.

Кроме контроля давлений в двигательных установках, изделиях авиационной и ракетно-космической техники, существует необходимость измерения давлений в нефтегазовой отрасли, например, геотермические и гидрогеологические исследования нефтяных и газовых скважин, процессов бурения, контроль работы установок добычи нефти и газа, где температура измеряемой среды может достигать значений 600 °С и где также предъявляются высокие требования по метрологическим и эксплуатационным характеристикам.

Большая часть существующих в настоящее время электронных компонентов эксплуатируется при максимальной рабочей температуре до 200 °С из-за ограничений традиционных материалов, используемых при их изготовлении (особенно кремния). Надежная архитектура приборов на основе технологии «кремний на диэлектрике» (КНД) способна расширить рабочий диапазон приборов приблизительно до 450 °С либо на короткий промежуток времени, либо при корпусировании с использованием водяного охлаждения. Однако при температурах более 450 °С конечным фактором, ограничивающим высокотемпературные кремниевые МЭМС-приборы, стано-

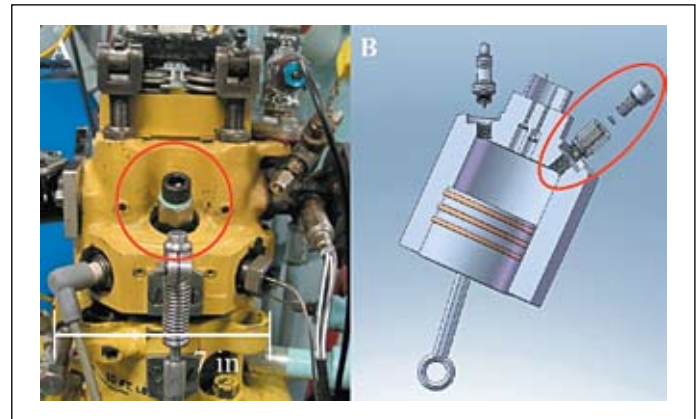


Рис. 2. Вариант размещения ВДД в двигателе

вится термомеханическая деформация кремния [6]. Поэтому современной тенденцией в микроэлектронике и микросистемотехнике является применение в изделиях приборостроения новых элементов, материалов, структур, имеющих уникальные технические показатели, для их использования при разработке и построении компонентов информационно-измерительных систем (датчиков) [8].

В [6] были представлены некоторые аспекты построения ВДД. Показано, что карбид кремния — наиболее перспективный материал для создания чувствительных элементов (ЧЭ) ВДД, соответствующих следующей совокупности современных требований, отражающих современные тенденции развития измерительных систем авиационной, ракетно-космической и гражданской техники:

- диапазон измерений — от 0,01 до 100,0 МПа;
- выходной сигнал при максимальном давлении — не менее 50 мВ;
- основная погрешность — не более $\pm 0,2\%$ от максимального давления;
- температурное смещение начального выходного сигнала и изменение чувствительности — не более $0,02\%/^{\circ}\text{C}$;
- рабочий диапазон температур — от -100 до $+900$ °С;
- долговременный дрейф от P_{max} — не более $0,01\%/$ год при условии применения ограниченной номенклатуры отечественных электро-радиоизделий особой категории качества;
- необходимость достижения улучшенных массо-габаритных характеристик при одновременном выполнении особых конструктивных требований, заключающихся в реализации механических соединений посредством резьбовых соединений, а электрических — посредством разъемов.

Сегодня известно около 200 кристаллических модификаций SiC. Таким образом, карбид кремния — один из наиболее ярких представителей политипных соединений. Основными же политипами для создания электронных приборов, в том числе ЧЭ ВДД, стали 3С-, 6Н- и 4Н-SiC.

В случае использования 3С-SiC (или β -SiC) жизнеспособной технологией выращивания в виде монокристаллического слитка приемлемого качества не существует. Поэтому в настоящее время принято выращивать его на кремниевой подложке CVD-методами. Однако значительное несоответствие решеток, существующее на гетеропереходе 3С-SiC/Si, вызывает многочисленные дефекты кристалла в гетероэпитаксиальном слое 3С-SiC, приводящие к временной нестабильности элементов, изготовленных на его основе. Кроме того, 3С-SiC имеет наименьшую из всех политипов ширину запрещенной зоны (2,3 эВ по сравнению с 2,9 эВ для 6Н- и 3,2 эВ для 4Н-SiC), что несколько ограничивает его применение для ЧЭ ВДД, особенно тех, которые эксплуатируются при температурах более 400 °С. Но недостаток 3С-SiC, связанный с рассогласованием решеток, компенсируется возможностью создания большего по сравнению с другими политипами размера исходной пластины, меньшими временными затратами на выращивание слоев SiC, относительно низкой стоимостью, обусловленной возможностью выращивания поликристаллических и монокристалличе-

ских форм на кремниевой подложке, а также отсутствием микроотверстий, которые представляют собой сквозные впадины диаметром от 0,5 до 10 мкм, простирающиеся через всю пластину: это характерное явление для политипов 4Н- и 6Н-SiC [9–12]. Кроме того, существует ряд публикаций, в которых описываются методы формирования 3С-SiC с улучшенными электрофизическими характеристиками, в том числе формирование монокристаллического 3С-SiC [13, 14, 18]. А анализ патентных материалов фирм, достигших наибольших успехов в проектировании и изготовлении ВДД на основе SiC, выявляет устойчивую тенденцию создания ВДД на основе SiC с использованием поликристаллических структур на основе 3С-SiC как наиболее технологически освоенного политипа [16].

Главные физические различия между гексагональными структурами SiC (или α -SiC) (2Н-SiC, 4Н-SiC, 6Н-SiC и n Н-SiC) заключаются в последовательности упаковки кремниевых-углеродных двойных атомных слоев, количестве атомов на элементарную кубическую решетку и постоянных решеток. Гексагональные кристаллы выращивают в больших слитках и нарезают на пластины, в настоящее время диаметр самых крупных из имеющихся в продаже — 100 мм [17, 18]. Для получения эпитаксиальных слоев нужной для различных приборов толщины и степени легирования (легирование азотом для n -типа и легирование бором для p -типа) может выполняться гомоэпитаксиальное выращивание химическим осаждением из паровой фазы на монокристаллической подложке. Существенным недостатком приборов на основе 4Н-SiC и 6Н-SiC, работающих на неосновных носителях зарядов, является ухудшение срока службы, выражающееся в увеличении токов утечки, снижении пробивного напряжения при обратном включении p - n -перехода и увеличении сопротивления в прямом направлении.

Исследования показали, что причина деградации — образование в пленках 4Н- или 6Н-SiC при протекании прямого тока прослоек кубического SiC, так называемых дефектов типа stacking faults, SF (дефектов упаковки). Это обусловлено тем, что энергия, выделяемая при безызлучательной рекомбинации электронно-дырочной пары в SiC, достаточна для преодоления атомом барьера, препятствующего его смещению в другое положение. То есть происходит перестройка решетки гексагонального политипа в кубический и образуется прослойка кубического политипа. Зародышем SF-дефектов служат дислокации в объеме эпитаксиального слоя или на границе «эпитаксиальный слой — подложка». Под действием прямого тока линейные размеры SF-дефектов быстро увеличиваются параллельно кристаллической оси «С» кристалла, и при достижении ими границы p - n -перехода наступает полная деградация [19].

Кроме того, как сказано выше, для политипов 6Н-SiC и 4Н-SiC характерны микроотверстия, которые представляют собой сквозные впадины диаметром от 0,5 до 10 мкм, простирающиеся через всю пластину [12]. Существующие методы формирования SiC (Lely-growth, seeded sublimation, CVD) полностью не устраняют проблему возникновения такого рода дефектов. При формировании тонких мембран в ЧЭ эти дефекты являются существенным ограничением для успешной реализации подобных конструкций. Так как, во-первых, они служат концентраторами механических напряжений, вызывающих преждевременное разрушение мембраны; во-вторых, такие микроотверстия служат своего рода микроканалами, через которые проникают газы, в том числе агрессивные, содержащиеся во внешней среде, вглубь материала и сквозь него, вплоть до измерительной схемы [12].

Далее будут представлены состояние разработок, тенденции развития, а также конструктивно-технологические проблемы создания ВДД на основе карбида кремния.

По результатам анализа печатных работ, патентно-информационных материалов, электронных ресурсов и других источников информации можно сделать вывод, что на сегодня фирма Kulite (США) достигла наибольших успехов в разработке ВДД, практически всецело освоив КНД-технологии и приступив к разработке ВДД на основе карбида кремния. Эта фирма является участником программ по разработке и внедрению датчиковой аппаратуры для авиационной и ракетно-космической техники и, как следствие, — имеет узконаправленную специфику своей деятельности, которая заключается в создании исключительно датчиков давления для ИИС военного назначения, ориентированных, в том числе, на применение в условиях воздействия неблагоприятных факторов, и прежде всего — повышенной температуры и виброускорений [20].

Кроме Kulite, подобными исследованиями и разработками занимается NASA Glenn Research Center (США), специализирующийся в числе прочих направлений космической деятельности на разработке и производстве ИИС, работоспособных при экстремальных условиях эксплуатации, включая ВДД на основе КНД-структуры и карбида кремния [21]. Как и Kulite, NASA Glenn Research Center, совместно с Akima Corporation (США), Sienna Technologies, Inc. (США) и Sandia National Labs (США), достиг значительных успехов в рассматриваемом направлении. Этот центр акцентирует основное внимание на таких вопросах, как исследование процессов получения слоев SiC, их свойств, методов обработки и т. д. применительно к ВДД, то есть превалирует теоретическо-технологическая направленность разработок. В то время как Kulite в своих исследованиях в большей степени решает задачи практическо-конструктивной на-

правленности, в частности ведет разработку конструкций ВДД, ЧЭ, сборку компонентов датчика, испытания изделий и т. д.

В общей сложности Kulite имеет более 40 патентов, имеющих непосредственное отношение к созданию ВДД на SiC [16]. Наиболее интересными патентами с точки зрения использования предложенных решений в реальных разработках, дошедших до стадии изготовления и испытания, являются US5549006, US6327911, US5165283, US7516668, US6691581, US6593209, US6691581 и US7518234. Все они имеются в свободном доступе на сайте Американского патентного ведомства [16]. Количество аналогичных патентов NASA Glenn Research Center не столь велико — не более 5, так как деятельность NASA Glenn Research Center по созданию приборов на основе SiC не ограничивается исключительно ВДД (существуют несколько десятков патентов, касающихся создания на SiC акселерометров, анемометров, форсунок двигателей и др.). В то же время у NASA Glenn Research Center — большее количество публикаций, прежде всего — в соавторстве с упомянутыми фирмами [21].

Остановимся на некоторых, наиболее характерных существующих конструктивно-технологических решениях, примененных упомянутыми фирмами по исследуемому направлению, с целью идентификации и анализа их достоинств и недостатков.

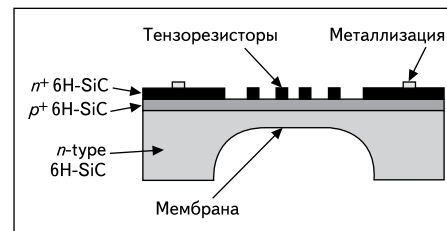


Рис. 3. ЧЭ ВДД фирмы Kulite

На рис. 3 представлен преобразователь ВДД на основе SiC фирмы Kulite, разработанный совместно с NASA Glenn Research Center [4, 22].

В конструкции на рис. 3 изоляция элементов схемы осуществляется с помощью SiC p - n -перехода, что устраняет такие проблемы, как неоднородность структуры и деградационные явления на границе раздела «SiC — SiO₂», а мембрана выполнена из SiC, что, безусловно, гарантирует стабильность метрологических характеристик ВДД при температурах более 450 °С (сравнительно с кремниевой мембраной).

Дальнейшая сборка данного ЧЭ осуществляется с помощью технологии так называемой бесприводной сборки, когда коммутация с электрической схемой осуществляется с помощью высокотемпературных контактов, штуцеров и стеклокристаллического припоя на основе порошков высокой проводимости и стекла (рис. 4) [22].

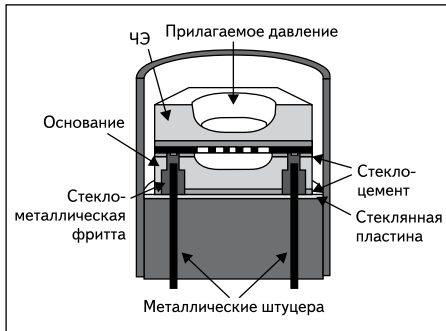


Рис. 4. Конструкция ВДД с ЧЭ на КНД-структуре с использованием технологии беспроводной сборки

Данные решения позволяют создавать как ВДД (более 450 °С без использования принудительного охлаждения), так и датчики, не чувствительные к линейному ускорению до 10 000 g и синусоидальной вибрации до 100 g при частоте до 2000 Гц.

Этот преобразователь был испытан при максимальной температуре 600 °С в диапазоне давлений от 25 до 1000 psi (от 0,17 до 6,8 МПа). Результаты испытаний в принципе показали адекватность разработанной конструкции поставленным задачам, но, помимо всего, обнаружился определенный проблемы. Например, существует значительная остаточная термическая деформация ЧЭ на основе SiC, которая выражается в наличии выходного сигнала с датчика после воздействия температур около 600 °С при отсутствии входного воздействия; есть и нелинейное изменение сопротивлений тензорезисторов из SiC в широком интервале температур, в связи, чем необходимо введение температурной компенсации в измерительную схему ЧЭ, что создает определенные проблемы, прежде всего технологического характера [22].

Robert Okoje и другие исследователи его группы разработали тензорезистивный преобразователь давления на основе 6H-SiC-тензорезисторов на 6H-SiC-подложке (рис. 5) [23, 25].

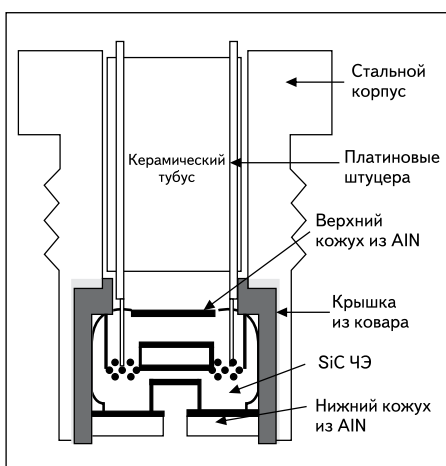


Рис. 5. Преобразователь давления на основе 6H-SiC тензорезисторов на 6H-SiC подложке

Особенность данной конструкции в том, что составляющие ее материалы обладают согласованным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), что значительно снижает механические напряжения, вызванные возможным рассогласованием по ТКЛР элементов конструкции, приводящие к полному разрушению датчика либо значительно увеличивающие мультипликативную и аддитивную составляющие погрешности при температуре эксплуатации до 600 °С. В качестве промежуточных элементов между ЧЭ из SiC и корпусом из стали могут быть использованы такие материалы, как AlN, ковар, то есть соответствующие материалу ЧЭ по ТКЛР.

Датчик был испытан при температуре 600 °С и давлении 200 psi (1,38 МПа), но в силу существенного снижения коэффициента тензочувствительности при высоких температурах потребовалась схема температурной компенсации на выходе преобразователя при температурах выше 400 °С [24].

Более подробно познакомиться с работами специалистов NASA Glenn Research Center в области исследования и создания приборов на основе карбида кремния можно на сайте центра, где представлено также множество другой информации о его деятельности [21].

Другие компании и отдельные ученые хотя и не достигли таких результатов, как вышеупомянутые фирмы, тем не менее активно занимаются проектированием и разработкой ВДД на основе карбида кремния и в совокупности изобретений приближаются по уровню разработок к Kulite и NASA Glenn Research Center [16]. Особенностью данных решений является диверсификация разработок при акцентировании не только на проблемы непосредственного создания ВДД на основе карбида кремния, но и устройств, имеющих хотя и апагогическое отношение к ВДД, но все же играющих значительную роль в конечной реализации таких датчиков. Далее рассмотрим некоторые результаты работ этих компаний и ученых.

C. Wu и другие из Department of Materials Science and Engineering и Department of

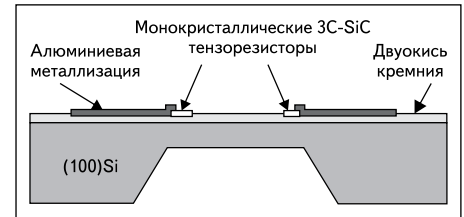


Рис. 6. ЧЭ на основе 3C-SiC тензорезисторов

Electrical Engineering and Computer Science Case Western Reserve University (США) разработали датчики давлений на основе объемной микрообработки для применений при высоких температурах с использованием поликристаллических и монокристаллических 3C-SiC тензорезисторов, выращенных на кремниевой подложке [3, 24]. ЧЭ одного из таких датчиков представлен на рис. 6.

Монокристаллические 3C-SiC тензорезисторы показали чувствительность 177,6 мВ/В/psi при комнатной температуре и 63,1 мВ/В/psi при температуре 400 °С. Их оцененный продольный коэффициент тензочувствительности оказался равным 18 при комнатной температуре, а при 400 °С упал до 7.

Специалисты трех немецких компаний разработали и испытали высокотемпературный датчик давления на основе 3C-SiC на изоляторе с терморезистором [30].

Датчик был испытан в диапазоне температур от 20 до 600 °С. При этом чувствительность при комнатной температуре составила 2,0 мВ·В⁻¹·бар⁻¹. Температурный коэффициент чувствительности (ТКЧ) в диапазоне температур от 20 до 500 °С был равен -0,16%/°С. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) поликристаллического терморезистора равен -0,17%/°С во всем диапазоне температур.

На рис. 7 представлены температурные зависимости удельного поверхностного сопротивления моно- и поликристаллических пленок 3C-SiC в диапазоне температур до 450 °С [30].

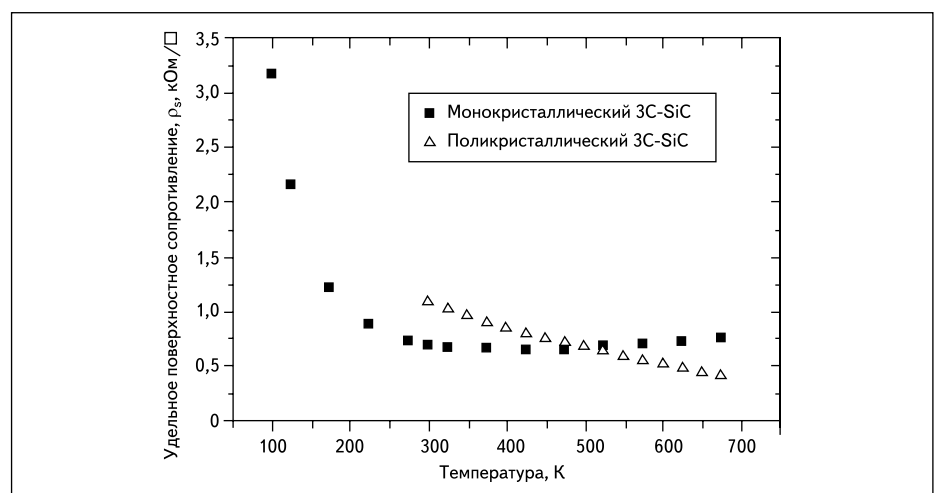


Рис. 7. Температурные зависимости удельного поверхностного сопротивления моно- и поликристаллических пленок 3C-SiC

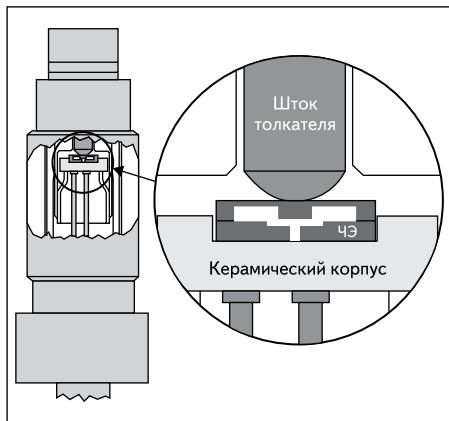


Рис. 8. Датчик давления на основе SiC

Необходимо сразу отметить, что представленные данные по зависимости сопротивления монокристаллического 3C-SiC от температуры расходятся по своим значениям с многими другими, опубликованными позднее, но которые не затрагивают практического использования карбида кремния в датчиках давления (в большинстве случаев увеличение сопротивления происходит при повышении температуры начиная с 250...400 °С, то есть значительно более высокой, чем на рис. 7). Тем не менее представленные зависимости весьма точно отражают тенденцию поведения монокристаллического 3C-SiC при изменении температуры, и авторами [30] сделан вывод о необходимости внутренней температурной компенсации с использованием по крайней мере одного термозависимого резистора.

Немного позже некоторыми из вышеупомянутых авторов совместно со специалистами известной итальянской фирмы Gefran был изготовлен и испытан датчик давления на основе SiC [31] (рис. 8). ЧЭ датчика представлен на рис. 9 [31].

ЧЭ изготовлен на основе пластин 6H-SiC (0001) *n*-типа со смещением от оси 3,5° производства фирмы Cree, Inc. (США). На пластине

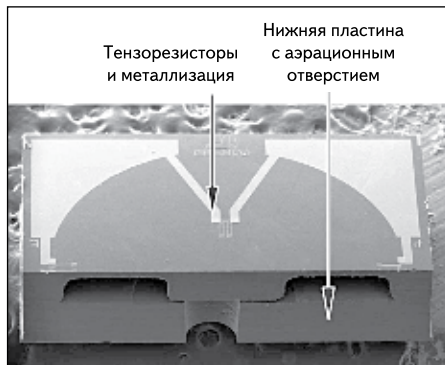


Рис. 9. Поперечный вид ЧЭ

тины для формирования *p-n*-перехода, необходимого для электрической изоляции тензорезисторов, были осаждены два эпитаксиальных слоя SiC. Для структурирования эпитаксиальных слоев разработан новый способ травления, обеспечивающий получение гладких поверхностей травления и скорости травления до 500 нм/мин. [31].

Для обеспечения однородности по толщине при изготовлении мембраны использовалось ультразвуковое сверление. Для ограничения перемещения выступа по технологии реактивного ионного травления и ультразвукового сверления была изготовлена нижняя пластина. Она прикреплена к неплавной стороне ЧЭ (рис. 9). Для обеспечения возможности эксплуатации кристалла при высоких температурах использована схема металлизации на основе вольфрама. Топология слоя металлизации предусматривает как проволочный монтаж, так и сварку для электрических соединений.

Для исследования ЧЭ фирмой Gefran была разработана новая технология корпусирования, когда давление передается от мембраны к ЧЭ посредством штока толкателя (рис. 8).

Благодаря правильному выбору материалов по коэффициенту теплового расширения и улучшенной механической развязке

между разными деталями корпуса, влияние температуры на точность измерений давления сведено к минимуму, что подтверждается результатами моделирования.

Измерения давления проводились в температурном диапазоне от 23 до 400 °С. При токе питания 1 мА и температуре 23 °С чувствительность к давлению составляла 330 мкВ/бар. С ростом температуры чувствительность монотонно падает, но при 400 °С она все еще составляет 200 мкВ/бар. Это поведение соответствует температурному коэффициенту выходного сигнала порядка $-0,1\%U_{\text{вых}}/^\circ\text{C}$.

На рис. 10 представлена температурная зависимость сопротивления тензорезисторов.

Как уже отмечалось, представленные данные отличаются от более ранних сведений (рис. 7), и являются более адекватными реальным значениям.

В России исследование по созданию ВДД проводит Центр микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ), который является родиной используемого во всем мире метода объемного роста SiC и на котором освоен экспериментальный выпуск 6H-SiC и 4H-SiC подложек диаметром 50–75 мм [18], а также созданы и отработаны методики и аппаратура для выращивания эпитаксиальных слоев 3C-SiC на Si [13, 14].

Таблица. Основные характеристики ЧЭ преобразователя давления

Диапазон номинальных давлений, кПа	от 10^2 до 16×10^3
Диапазон измеряемых (рабочих) температур, °С	от -50 до +450
Стабилизированное напряжение питания, В	5,0
Номинальный выходной сигнал (по давлению), мВ	от 25 до 30
Нелинейность выходного сигнала, %	0,1; 0,25; 0,5
Температурный коэффициент чувствительности, %/°К	0,1

Основные характеристики ЧЭ преобразователя давления серии «Карборунд» университета ЛЭТИ представлены в таблице [27].

Основной конструкционной особенностью данного ЧЭ ВДД является использование структуры «карбид кремния на диэлектрике» (рис. 11).

В качестве изоляции используются диэлектрические слои ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$), мембрана состоит из утолщенного периферийного основания и профиля с концентраторами механических напряжений, представляющих собой сочетание утонченных участков и жестких центров, что повышает чувствительность преобразователя. При размещении тензо-

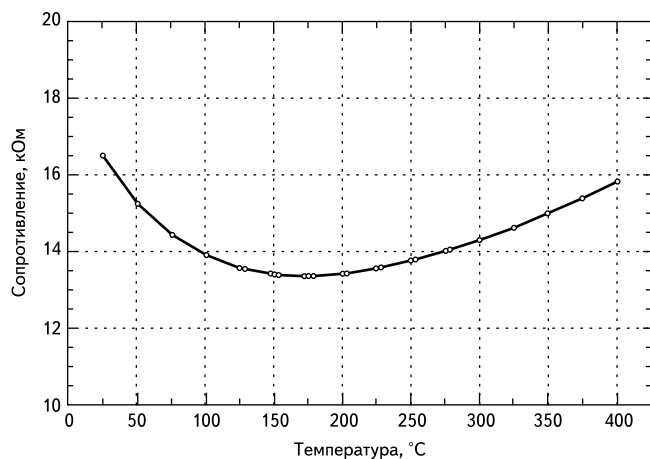


Рис. 10. Температурная зависимость сопротивления тензорезисторов

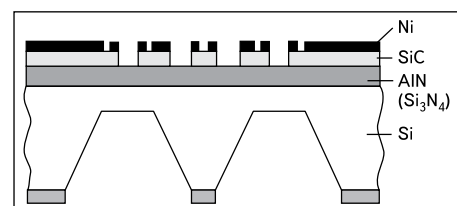


Рис. 11. Конструкция ЧЭ ВДД

резисторов используется тангенциальное их расположение, что обеспечивает равномерное распределение механических напряжений по тензорезистору, а сопротивление резисторов (5 кОм) выбрано таким образом, чтобы, с одной стороны, исключить их саморазогрев, а с другой — минимизировать «шумовые» явления [27].

Это техническое решение потенциально способно обеспечить достижение обобщенных характеристик ВДД с учетом современных требований авиационной и ракетно-космической техники за счет использования карбида кремния в качестве материала чувствительного элемента. Тем не менее отсутствие однородной по своему составу конструкции отрицательно влияет на технологичность изготовления датчика в целом, а также снижает метрологические характеристики преобразователя, в частности, долговременный дрейф основной погрешности. Кроме того, верхнее значение диапазона рабочих температур (450 °С) не соответствует современным требованиям авиационной, ракетно-космической и гражданской техники [2, 6], что обусловлено в первую очередь отсутствием решения задач, связанных с разработкой омических контактов металл-полупроводник, устойчивых при температурах до 600 °С, а также использованием кремния в качестве элемента мембраны.

Интересна работа Stanley J. Ness из Air Force Institute of technology, направленная на исследование и уменьшение механических напряжений в пленках карбида кремния политипов 6Н-SiC, 4Н-SiC, 3С-SiC с помощью спектрометра комбинационного рассеяния [15].

Представляет интерес сообщение о том, что американская компания Endevco в конце 2007 года приобрела лицензию у NASA Glenn Research Center на 3 изобретения, связанные с изготовлением и сборкой датчиков давлений на основе карбида кремния [26]. Это решение в перспективе позволит достичь уровня разработок фирмы Kulite по расширению температурного диапазона и улучшению метрологических характеристик датчиков.

Анализируя научно-технические публикации, а также патентную информацию, представленные выше, можно актуализировать тенденции развития по указанному направлению и обобщить исследования и разработки в области создания ВДД на основе карбида кремния, которые заключаются в следующем:

1. За последние 10–15 лет размеры коммерческих SiC-подложек увеличились более чем в десять раз, а плотность их дефектов уменьшилась на три порядка. С каждым годом улучшаются параметры SiC-приборов и растет число компаний, занимающихся их разработкой. Исследования карбида кремния все больше переходят из университетских лабораторий в лаборатории промышленных компаний. Карбид крем-

ния выделяется среди других политипных соединений как наличием большого числа стабильных политипов и большой разницей в их электрофизических свойствах, так и высокой термической, химической и радиационной стойкостью.

2. Основными политипами для создания электронных приборов, в том числе ВДД, стали 3С-, 6Н- и 4Н-SiC. Из них 4Н-SiC обычно используется для производства электронных приборов, в том числе GaN-диодов голубого свечения, из-за отличных от остальных политипов электронных свойств, например, высокой осевой подвижности носителей заряда, которая на порядок выше, чем в 6Н-SiC. Для МЭМС-применений, в том числе ВДД, наибольшее применение нашел 3С-SiC (имеется в виду 3 С-SiC, выращенный на подложке из Si) по следующим причинам:

- С применением данного политипа возможно формировать больший по сравнению с другими политипами размер исходной пластины.
- Меньшие временные затраты на выращивание слоев SiC, относительно низкая стоимость, обусловленная возможностью выращивания поликристаллических форм на кремниевой подложке.
- Отсутствие микроотверстий, которые представляют собой сквозные впадины диаметром от 0,5 до 10 мкм, простирающиеся через всю пластину, — характерное явление для политипов 4Н- и 6Н-SiC (хотя в [12] и предложена методика, устраняющая данный недостаток), что является лимитирующим фактором при формировании тонких мембран для успешной реализации подобных конструкций.
- Существующие методы формирования 3С-SiC позволяют получать слои с улучшенными электрофизическими характеристиками, в том числе монокристаллический 3С-SiC, что до последнего времени являлось сдерживающим фактором по использованию 3С-SiC, так как наличие остаточных напряжений на границе раздела 3С-SiC-Si значительно уменьшало соотношение «сигнал/шум» при использовании тензорезистивного принципа преобразования.
- Энергия ионизации донорной примеси для 6Н-SiC — больше энергии ионизации для 3С-SiC, то есть ТКС тензорезисторов будет обладать более ярко выраженной нелинейностью.
- 3С-SiC, получаемый гетероэпитаксией на кремнии, не интенционально обладает электропроводностью *n*-типа, при этом концентрации основных носителей является достаточной для формирования ЧЭ ВДД.

Ограничением для использования 3С-SiC в ВДД является наличие кремниевого основания, которое исключает использование дат-

чиков при температурах более 450 °С. В некоторых решениях, когда кремний хотя и является основанием ЧЭ, не выступает в роли воспринимающего давление элемента, и его механические характеристики, по сути, остаются постоянными в процессе измерений во всем интервале температур, удалось устранить данный недостаток, но ценой ухудшения технологичности изготовления ЧЭ. Кроме того, существуют значительные термические и структурные рассогласования на границе раздела между β -SiC и Si (8% и 20% соответственно), что обуславливает формирование *p-n*-переходов низкого качества, а SiO₂, полученный на 3С-SiC, обладает высокой плотностью дефектов.

Кроме того, гетеропереходы, образующиеся на границе раздела SiC/Si, являются причиной возникновения высоких токов утечки при повышенных температурах. Использование структур «карбид кремния на изоляторе» не всегда приводит к устранению данной проблемы, так как между изоляционным слоем двуоксида кремния и слоем 3С-SiC существует тонкий слой кремния, не полностью преобразовавшийся в карбид кремния при проведении операций по гетероэпитаксиальному наращиванию 3С-SiC, что приводит к образованию нежелательных гетеропереходов и так называемых «гибридных» (SiC/Si) тензорезисторов.

3. В качестве материала для тензорезисторов в ВДД на основе карбида кремния предпочтительнее использовать SiC *n*-типа проводимости, так как:

- В связи с более высокой энергией активации примеси *p*-типа для невырожденного β -SiC примеси ионизируются при более высоких температурах окружающей среды, поэтому ТКС тензорезисторов будет обладать более ярко выраженной нелинейностью, чем в случае β -SiC *n*-типа проводимости.
- Метод формирования омических высокотемпературных контактов для *n*- β -SiC исследован и технологически освоен в большей степени.
- Тензорезистивные свойства *n*- β -SiC исследованы в большей степени, чем аналогичные свойства *p*- β -SiC.
- Методы травления *n*- β -SiC с точки зрения формирования измерительной схемы с использованием *p*- β -SiC в качестве стоп-слоя исследованы и широко применяются, в то время как аналогичное травление *p*- β -SiC и использование *n*- β -SiC в качестве стоп-слоя в достаточной степени не освоены.

Кроме того, уровень легирования тензорезисторов обратно пропорционален амплитуде выходного сигнала и прямо пропорционален ее временной стабильности. Поэтому вырожденный β -SiC может являться наиболее оптимальным вариантом с точки зрения временной стабильности выходного сигнала преобразователя.

4. За последнее десятилетие достигнут прогресс в выращивании подложек из цельного кристалла SiC и эпитаксиальном выращивании кристаллических SiC-слоев на кремниевой или карбидкремниевой подложке, а также сделано множество попыток разработки и изготовления ВДД на основе карбида кремния различных конструкций и с использованием многообразных методов их изготовления и сборки. Однако с целью обеспечения требуемых характеристик (прежде всего метрологических) ВДД с ЧЭ на основе карбида кремния их аналогам из кремния необходимо решить ряд проблем, с большинством из которых разработчики ВДД на основе карбида кремния столкнулись в последние годы:

- Обеспечение надежной и адекватной жестким условиям применения контактной металлизацией, так как при температурах около 600 °C SiC, реагируя с металлами, проявляет склонность к образованию карбидов и/или силицидов, что отрицательно влияет на металлические контакты, ухудшая характеристики ВДД, когда колебания контактного сопротивления при повышенных температурах могут быть неотличимы от изменения вследствие тензорезистивного эффекта.
- Карбид кремния имеет относительно низкий коэффициент тензочувствительности (30 при нормальных условиях и 15 при температурах более 500 °C, в сравнении с 90 для кремния), что уменьшает амплитуду выходного сигнала ВДД. Кроме того, отсутствуют данные по температурной и концентрационной зависимостям коэффициента тензочувствительности SiC (хотя в [28, 29] была сделана попытка вывода таких зависимостей, но из-за недостаточного объема информации, прежде всего — экспериментальной, полученные данные требуют уточнения).
- Существует значительная остаточная термическая деформация ЧЭ на основе карбида кремния, которая выражается в наличии выходного сигнала с датчика после воздействия температур более 500 °C при отсутствии входного воздействия.
- Существует нелинейное изменение сопротивления тензорезисторов из SiC в широком интервале температур, в связи чем необходимо введение температурной компенсации в измерительную схему ЧЭ, что создает определенные проблемы, прежде всего — технологического характера, так как при проведении операций диффузии и ионной имплантации по формированию элементов термокомпенсации необходимо использование температур вплоть до 1900 °C, когда происходит сублимация атомов Si, что в свою очередь обуславливает применение дополнительных мер по устранению или минимизации нежелательных последствий.

- Срок службы ЧЭ на основе SiC при температурах более 500 °C ограничивается не самим полупроводником, в большей степени он зависит от надежности и устойчивости различных границ раздела с поверхностью кристалла SiC, в том числе электрической целостностью границ раздела «оксид – полупроводник», которая характеризуется высокой плотностью состояний, в отличие от границы раздела Si–SiO₂.
- Недостаточный объем исследований упругих свойств и долговременной стабильности карбидкремниевых нано- и микроструктур при повышенных температурах накладывает существенные ограничения на использование SiC в датчиках давления. Например, известно, что существует термическая остаточная деформация ЧЭ на основе карбида кремния, приводящая к наличию начального выходного сигнала датчика порядка 10 мВ [22].
- Необходимо развитие и совершенствование технологии сборки ВДД на основе карбида кремния с точки зрения удовлетворения требований механической работы системы («ЧЭ – корпус датчика»), то есть уменьшение термомеханических напряжений, обусловленных несоответствием КТР материала ЧЭ, корпуса и других составных элементов датчика. Данная проблема фактически не нашла решения в существующей патентной документации и практически не отражена в научно-технической документации, касающейся ВДД.

Кроме того, анализ соответствия достигнутых характеристик и обобщенных требований позволил установить, что в силу противоречивости и трудности их одновременного удовлетворения в настоящее время не созданы образцы ВДД на основе карбида кремния, технические характеристики которых обеспечивали бы решение задач совершенствования изделий авиационной, ракетно-космической и гражданской техники. Многообразие решаемых задач не позволит также реализовать указанную номенклатуру требований с применением одной универсальной конструкции или метода.

Можно предположить, что неудовлетворительное состояние исследований, направленных на создание ВДД на основе карбида кремния, объясняется отсутствием технологической составляющей (выращивание слоев SiC, легирование, диффузия, температурная компенсация слоев на этапе эпитаксии и т. д.), а большинство методов ее обеспечения не обладает требуемой эффективностью, так как не в полной мере отражает процессы функционирования реальных ВДД.

В этой связи теоретические методы обеспечения обобщенных требований к ВДД на основе карбида кремния требуют дальнейшего исследования и развития. ■

Литература

1. Коптев Ю. Н., Гориш А. В. Датчиковая аппаратура для ракетно-космической техники // Радиотехника. 1995. № 10.
2. Гуревич О. С., Буряченко А. Г., Ранченко Г. С. Перспективы развития датчиков давления для авиационных и общепромышленных ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. № 10.
3. Patricia M. NIEVA. New Trends on MEMS Sensor Technology for Harsh Environment Applications // Sensors & Transducers Journal. Special Issue. Oct 2007.
4. Hunter G. W., Neudeck P. G., Okojie R. S., Beheim G. M., Powell J. A.. An Overview of High-Temperature Electronics and Sensor Development at NASA Glenn Research Center // J. Turbomach. Oct 2003. Vol. 125, Issue 4.
5. Katulka G. L. Micro-electromechanical Systems and Test Results of SiC MEMS for High-g Launch Application. Proceedings of IEEE Sensors. June 2002. USA.
6. Мокров Е. А., Баринов И. Н. Разработка высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 1.
7. Wodin-Schwartz S., Myers D. R., Kramer R. K., Sun Choi, Jordan A., Wijesundara M. B. J. Hopcroft M. A., Pisano A. P. Silicon and Silicon Carbide Survivability in an In-Cylinder Combustion Environment — <http://www.eecs.berkeley.edu/~myers/Papers/Silicon%20and%20Silicon%20Carbide%20Survivability%20in%20an%20In-Cylinder%20Combustion%20Environment.pdf>
8. Neudeck P.G., Okojie R. S., Chen L.-Y. High-Temperature Electronics — A Role for Wide Bandgap Semiconductors? Proceedings of the IEEE. 2002. Vol. 90, no. 6 — <http://www.grc.nasa.gov/WWW/SiC/reviewpapers.html>
9. Патент US6327911.
10. Wright N. G., Horsfall A. B., Vassilevski K. Prospects for SiC electronics and sensors // Materials Today. Jan–Feb 2008. Vol. 11. № 1–2.
11. Патент US6691581.
12. Патент US6593209.
13. Матузов А. В. Технология структур «карбид кремния – кремний» для приборов микроэлектроники и микросистемной техники: дис. канд. техн. наук. 05.27.2006.
14. Ильин В. А., Матузов А. В., Петров А. С. Исследование процесса получения гетероэпитаксиальных структур 3С-карбида кремния на подложках кремния // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2008. № 4.
15. Ness S. J. Stress Analysis of Silicon Carbide Microelectromechanical Systems Using Raman Spectroscopy. Master's thesis. Jun 2002 – Mar 2003 — <https://research.maxwell.af.mil/papers/ay2003/afit/AFIT-GMS-ENP-03-01.pdf>
16. www.uspto.gov
17. www.cree.com
18. Лучинин В., Таиров Ю. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету // Современная электроника. 2009. № 7.

19. Лебедев А., Сбруев С. SiC-электроника. Прошлое, настоящее, будущее // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 5.
20. www.kulite.com
21. <http://www.grc.nasa.gov/WWW/SiC/publications.html>
22. 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. Kulite Semiconductor Products, Inc. Twenty-First Transducer Workshop. Lexington, Maryland. June 22–23, 2004 — www.kulite.com/reference/improvesicleadless.pdf
23. Okojie R., Beheim G., Saad G., Savrun E. Characteristics of a Hermetic 6H-SiC pressure sensor at 600 °C // In Proc. of the AIAA Space 2001 Conference and Exposition. Albuquerque, NM. Aug 28–30, 2001 — www.grc.nasa.gov/WWW/SiC/publications/Hermetic6H.pdf
24. Wu C., Zorman C., Mehregany M. Fabrication and Testing of Bulk Micromachined Silicon Carbide Piezoresistive Pressure Sensors for High Temperature Applications // IEEE Sensors Journal. 2006. 6, 2 — http://drkuo.net/archives/2_A3-09P.pdf
25. Патент US5549006.
26. www.grc.nasa.gov
27. <http://www2.fep.tsure.ru/books/conferenc/pem2002/part2/s146-152.pdf>
28. Разработка высокотемпературных диффузионных чувствительных элементов на основе карбида кремния: Отчет по научно-исследовательской работе по договору А-43-71 от 13.11.1970 с организацией НИИИТ / Новосибирский электротехнический институт, кафедра диэлектриков и полупроводников. Рук. В. С. Шадрин. Новосибирск, 1971.
29. Разработка высокотемпературных элементов на основе карбида кремния: Отчет по научно-исследовательской работе (Часть 1) по теме «Тензор» (договор А-43-73 от 15.12.1972 с организацией НИИИТ) / Новосибирский электротехнический институт, кафедра диэлектриков и полупроводников. Рук. В. С. Шадрин. Новосибирск, 1973.
30. Ziermann R., von Berg J., Obermeier E., Wischmeyer F., Niemann E., Möller H., Eickhoff M., Krötz G. High temperature piezoresistive β -SiC-on-SOI pressure sensor with on chip SiC thermistor // Materials Science and Engineering. Vol. 61–62, 30 July 1999.
31. Wiczorek G., Schellin B., Obermeier E., Fagnani G., Drera L. SiC Based Pressure Sensor for High-Temperature Environments // IEEE Sensors 2007 Conference. Oct 28–31, 2007.