

Прецизионный сенсор давления на базе монокристаллического кремния

А. Адамова, к. т. н.¹, Т. Цивинская²

УДК 621.3.049.774::621.382::531.78 | ВАК 05.11.01

Иногда те свойства, которые в теории определяют высокие целевые характеристики микроэлектронного устройства, одновременно являются труднопреодолимым препятствием для обеспечения его точной и устойчивой работы. Но доказанные в лабораториях возможности таких устройств заставляют искать и находить решения, позволяющие довести разработку до уровня готовности к практическому применению и серийному производству. Примером успешного выхода из подобной ситуации может служить история разработки малогабаритного датчика давления на основе монокристаллического кремния, проводившейся в интересах развития испытательной базы Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ).

При создании объектов, работающих в условиях сильных, быстро меняющихся воздействий внешней среды и собственных нагрузжений, особенно важно обеспечить гарантированную прочность и долговременную надежность их конструкции. Построить математическую модель, абсолютно точно отображающую функционирование объекта в сложных условиях, невозможно, ученым и инженерам необходимы экспериментальные данные, которые они получают в ходе автономных испытаний узлов создаваемых объектов в лабораториях и на стендах, а затем и при натурных комплексных испытаниях опытных образцов. Для всех этих работ необходимы датчики, измеряющие воздействия среды и реакцию объекта на них, показания которых позволяют проверить расчеты, уточнить математические модели, доработать конструкцию, подтвердить заявленные характеристики конечного изделия и входящих в него узлов и агрегатов. Проблема создания датчиков с необходимой точностью измерений, соответствующих условиям эксплуатации и требованиям в части установки на объекте, остается актуальной по сей день.

Одним из наиболее распространенных типов датчиков, применяемых при исследовании и испытаниях моделей и натурных образцов летательных аппаратов, является датчик давления. На заре освоения стендовых испытаний специалистам ЦАГИ приходилось применять то, что было доступно – общепромышленные датчики объемной конструкции. Для установки датчика необходимо было

сверлить в поверхности исследуемого объекта отверстия диаметром несколько миллиметров; не менее важным было то, что датчик вызывал местное нарушение течения воздушного потока, то есть сам вносил искажения в значение того параметра, который должен был измерить.

Подобный вид установки датчиков изначально не мог удовлетворять испытателей. С усложнением конструкций, требовавших всё более детализированных схем измерений, число точек, в которых было необходимо проводить замеры, увеличивалось; кроме того, существовала проблема недостаточной точности измерений. Поиски решения привели к методике многоточечного измерения, в которой использовались многоточечные измерительные модули – такие, например, как модуль измерения давления с 12 чувствительными элементами (ЧЭ), показанный на рис. 1. Размещение 12 ЧЭ практически в одной точке объекта позволяло повысить точность измерений путем осреднения их показаний. Установка подобных модулей на объект занимала много времени, но уже не требовала сверления отверстий. Однако модули этого типа монтировались на объект через толстую эластичную прокладку с системой воздухопроводов и, следовательно, не устраняли проблему нарушения обтекания объекта потоком воздуха.

В 1983 году в ЦАГИ приступили к разработке датчика, который позволил бы измерять давление без продельвания отверстий в объекте и при этом не оказывал бы значимого влияния на течение воздушного потока. В целом перечень требований к конструкции датчика давления выглядел следующим образом:

- исключение значимых искажений обтекающего потока, для чего толщина установленной на объекте измерительной сборки, включающей датчик и все необходимые для его монтажа детали и материалы,

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана, доцент кафедры ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», Arinaadamova75@gmail.com.

² ООО «Сенсорные системы МГТУ им. Н. Э. Баумана», главный технолог, tsivinskaya_t@mail.ru.

не должна превышать 1,5 мм. При этом требующаяся для установки датчика доработка поверхности должна быть минимальной;

- высокая чувствительность, необходимая для измерения малых значений давления с большой точностью;
- возможность измерения давлений в различных диапазонах в пределах от 0,1 до $2 \cdot 10^5$ Па с минимальным изменением конструкции датчика и без каких бы то ни было изменений в технологическом маршруте его изготовления;
- долговременная стабильность начального (при нулевом значении измеряемой величины) и выходного сигналов;
- параметры выходного сигнала, позволяющие просто и надежно передавать его в систему обработки данных;
- сохранение работоспособности в агрессивных средах, в диапазоне температур от криогенных до +150 °С, способность выдерживать линейное ускорение до 10 g без заметного влияния на показания по измеряемому параметру;
- минимальные габариты датчика для обеспечения возможности измерения одновременно нескольких

величин (давления, температуры, деформации, вибрации и т. д.) практически в одной точке.

Выбор остановили на емкостных тонкопленочных датчиках давления, и в 1987 году первые их образцы прошли испытания.

В конструкцию пленочного датчика также была заложена идея осреднения давления по площадке измерений, для чего на одной подложке формировалось несколько ЧЭ. Основой ЧЭ является тонкопленочный конденсатор с твердым (рис. 2) или газообразным (рис. 3) диэлектриком. Конструктивно датчик представляет собой многослойную структуру, в которой слои из полиимидной пленки чередуются с металлической фольгой из меди, никеля или алюминия. Слои соединяются между собой при помощи клея типа ГИПК или лака на основе диангирида дифенилоксида тетракарбоновой кислоты (ДФО) и диаминодифенилового эфира резорцина (ДДЭР). Сборка имеет отличную радиационную стойкость, хорошую электрическую прочность, высокую механическую прочность и гибкость. Кабель питания припаивается к верхнему проводнику, если последний сделан из никеля или меди, или приклеивается, если из алюминия. К нижнему проводнику присоединяется кабель съема сигнала.

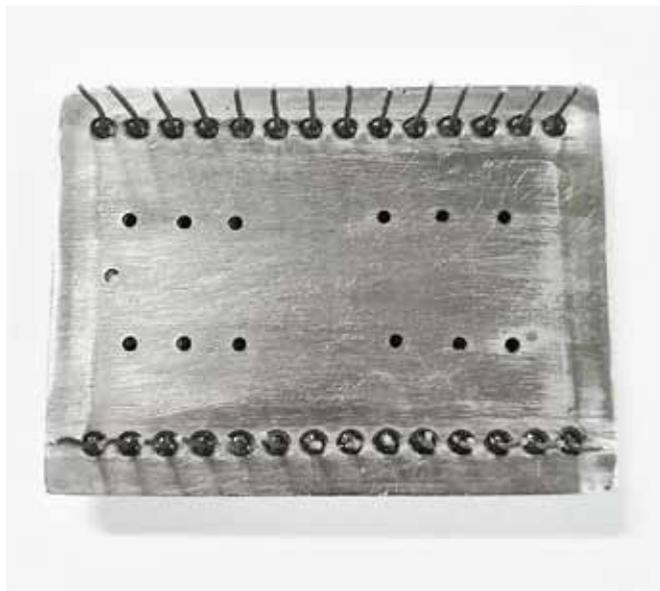


Рис. 1. Пример многоточечного модуля измерения давления. В корпусе модуля смонтированы 12 чувствительных элементов, доступ давления к ним осуществляется через отверстия в нижней поверхности корпуса модуля. Для подвода давления к отверстиям между выводами модуля закрепляется эластичная прокладка с системой воздухопроводов, толщина которой превышает длину выводов. Сборка монтируется на поверхность объекта нижней поверхностью прокладки

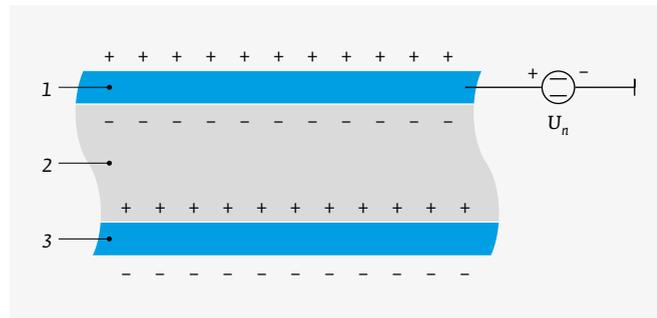


Рис. 2. ЧЭ с твердым диэлектриком: 1 – верхний проводник; 2 – эластичный диэлектрик; 3 – нижний проводник

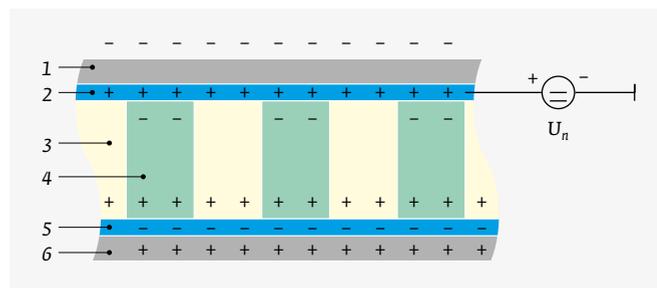


Рис. 3. ЧЭ с газообразным диэлектриком: 1 – слой диэлектрика; 2 – верхний проводник; 3 – газ; 4 – перфорированный диэлектрик; 5 – нижний проводник; 6 – слой диэлектрика

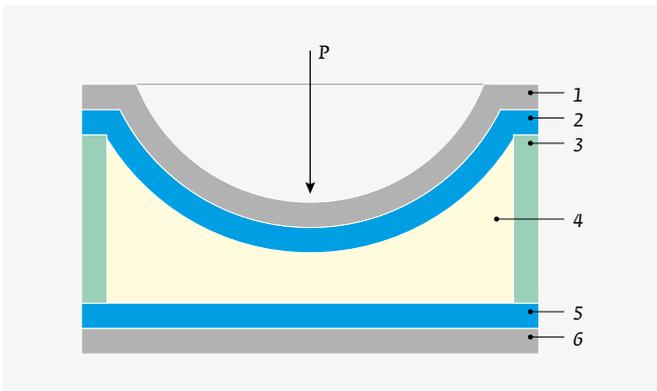


Рис. 4. Единичная ячейка ЧЭ с газообразным диэлектриком под воздействием давления: 1 – слой диэлектрика; 2 – верхний проводник; 3 – перфорированный диэлектрик; 4 – газ; 5 – нижний проводник; 6 – слой диэлектрика

Принцип действия пленочного емкостного датчика легко понять на примере одной ячейки ЧЭ с газообразным диэлектриком (рис. 4): при изменении объема ЧЭ в результате воздействия давления изменяется его емкость и, соответственно, падение напряжения на ЧЭ, которое и является выходным сигналом датчика.

Основные достоинства датчика: малая толщина, не вносящая искажений в обтекающий поток; гибкость конструкции, позволяющая закреплять датчик на поверхностях сложной конфигурации путем простого приклеивания [1].

Создание емкостных тонкопленочных датчиков внесло очень значительный вклад в усовершенствование конструкций летательных аппаратов (ЛА), особенно за счет изучения физических процессов в поверхностном слое ЛА при движении со сверхзвуковой скоростью – уже только потому, что альтернативы им не существовало. Датчики этого типа и сейчас активно используются при испытаниях в аэродинамических трубах, поскольку их характеристики достаточны для проведения широкого спектра исследований. Тем не менее, для многих применений характеристики тонкопленочных емкостных датчиков оставляют желать лучшего. К их основным недостаткам относятся:

- отсутствие долговременной стабильности начального и выходного сигнала, нелинейность характеристики изменения объема и, следовательно, нелинейная зависимость емкости от давления, минимальное измеряемое давление 10 Па («мертвая зона»), погрешность измерения 4% и выше – результат применения в качестве конструкционного материала полимеров, которые меняют свои свойства под воздействием времени, температуры и влажности, механической нагрузки;

- возможность градуировки датчика только после наклейки на объект, поскольку его электрические параметры существенным образом зависят как от текущих характеристик окружающей атмосферы, так и от расположения датчика относительно различных токоведущих и излучающих элементов объекта и испытательного стенда;
- зависимость результата измерения от влияния внешних электромагнитных помех, вызывающих наводки в относительно больших площадях металлизированных поверхностей чувствительного элемента;
- необходимость поляризации высоким напряжением для получения большей чувствительности;
- невозможность содержательной корректировки выходного сигнала (напряжения), его можно только усилить;
- потеря качества тонкой высокочувствительной мембраны конденсаторного микрофона при воздействии потока, всегда содержащего то или иное количество пылевых частиц. Особенно это существенно при натурных испытаниях, когда замена датчика может потребоваться после каждого полета. Помимо очевидного перерасхода материальных средств, негативный эффект состоит также и в том, что характеристики датчиков в рамках допусков индивидуальны – нарушается повторяемость замеров и, следовательно, возникает ошибка при обработке данных, полученных в процессе испытаний.

Появление новых типов полимеров и технологий их обработки позволит улучшить характеристики тонкопленочных емкостных датчиков, но не устранил полностью недостатки, вызванные нестабильностью физических свойств полимерных материалов. Насколько можно судить сегодня, возможности таких датчиков в части обеспечения точности измерений имеют ограничения, а их применение в автоматизированных системах контроля для долговременных исследований, связанных с надежностью конструкций, а также в системах непрерывного мониторинга критических параметров объектов в ходе эксплуатации, как минимум вызывает серьезные технические и эксплуатационные трудности, а в ряде случаев совсем невозможно.

Решение проблем, связанных с недостатками тонкопленочных емкостных датчиков, надо было искать на пути создания новых конструкций чувствительных элементов, которые основывались бы на материалах, имеющих стабильные механические, физические и химические свойства. Одним из таких материалов является монокристаллический кремний, обладающий идеальной упругостью и исключительно высокой тензочувствительностью. С использованием этого материала в 1990-х годах был разработан интегральный преобразователь давления – ИПД.

Преобразователь представлял собой кристалл с размером в плане 4×4 мм и толщиной 425 мкм. На одной из сторон кристалла методом химического травления сформирована чувствительная мембрана толщиной от 5 до 250 мкм – в зависимости от величины измеряемого давления. На противоположной стороне, в зоне периметра чувствительной мембраны, путем диффузии бора в кремний сформированы четыре пьезорезистора р-типа проводимости, которые изолированы от подложки большим сопротивлением р-п-перехода. Пьезорезисторы объединены в мостовую схему (рис. 5). Для уменьшения влияния высокой температурной чувствительности монокристаллического кремния в схему моста введена транзисторная схема термокомпенсации. Важно отметить, что все элементы электрической схемы (тензорезисторы, резисторы, транзистор, терморезисторы) сформированы непосредственно в основном материале, что повышает чувствительность к измеряемому параметру и точность измерения за счет отсутствия очагов паразитных механических напряжений, возникающих на границах соединений различных материалов в единую конструкцию.

Достоинства ИПД:

- прямолинейная зависимость выходного сигнала от приложенной нагрузки;
- дрейф нулевого и выходного сигнала не более 0,001%;
- погрешность измерения не более 0,02% от измеряемой величины;
- температурная погрешность не более 0,02% от измеряемой величины;
- выходной сигнал не менее 80 мВ при питании 5 В, отсутствие зоны нечувствительности в начале диапазона;
- диапазон измеряемых давлений от 0,1 Па до 100 МПа (в зависимости от толщины чувствительной мембраны).

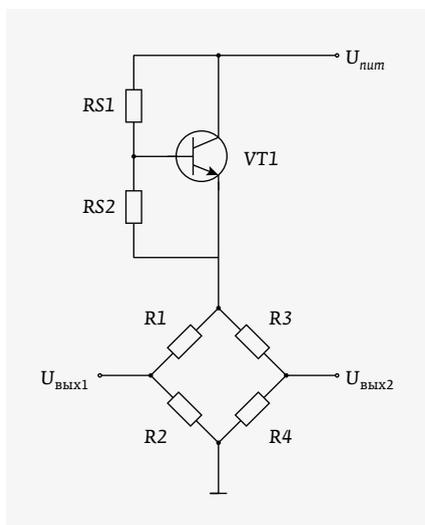


Рис. 5. Электрическая схема ИПД

Свойства кристалла ИПД были детально изучены, была разработана технология изготовления кристаллов групповым способом, что сделало их дешевыми. Исследования по механической надежности методом программного моделирования [2] подтвердили, что при правильно выбранных, в зависимости от прилагаемой нагрузки, габаритных размерах и толщине чувствительной мембраны величина перемещения ее центра не превышает 0,5 мкм; так, для мембраны толщиной 20 мкм перемещение под воздействием максимальной расчетной нагрузки составило 0,351 мкм, то есть мембрана остается практически неподвижной. При этом максимальные механические напряжения локализуются на небольшой площади в центре мембраны и не затрагивают материал на ее границе – в зоне, наиболее уязвимой с точки зрения воздействия разрушающих деформаций. Эти результаты наряду с высоким пределом прочности монокристаллического кремния (среднее значение 450 МПа) гарантируют высокую надежность кристалла при длительной эксплуатации.

К сожалению, при всех достоинствах ИПД использовать его по прямому назначению – для измерения давления – оказалось невозможно. Одной из причин этого стал недостаток кремниевого кристалла – его хрупкость, другой – его достоинство: высокая тензочувствительность. Кристалл, наклеенный на полимерную пленку перед монтажом на объект, легко разрушался при самой незначительной изгибающей нагрузке, а выделить рабочий сигнал не удавалось из-за активной реакции чувствительного элемента на механические напряжения, вызванные деформацией пленки и клеевого соединения. Собранный же на базе кристалла датчик в металлокерамическом корпусе (рис. 6) имел толщину 3 мм, что не соответствовало требованиям установки на объект.

Однако высочайший потенциал монокристаллического кремниевого ЧЭ необходимо было довести до практического использования. Задача, фактически, состояла

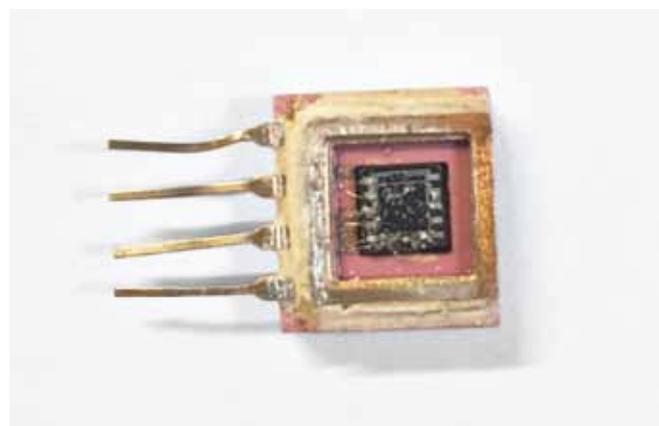


Рис. 6. Датчик на базе кристалла ИПД в металлокерамическом корпусе

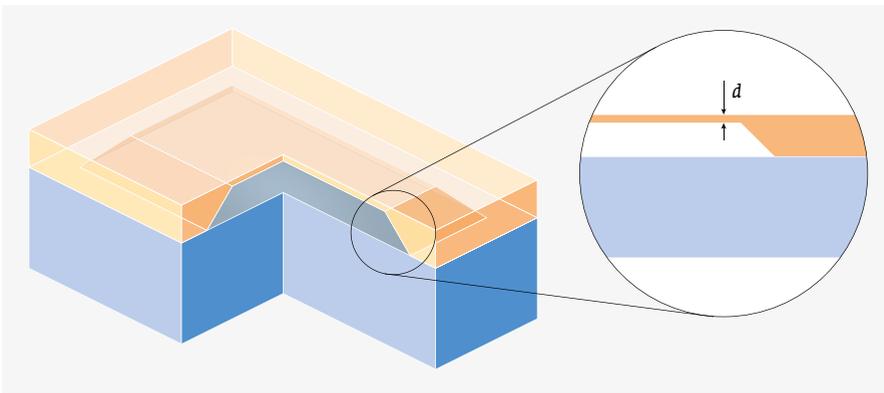


Рис. 7. Модель конструкции чувствительного элемента: пластина из монокристаллического кремния, соединенная со стеклянным пьедесталом

в том, чтобы найти способ исключить воздействие на тензорезисторы деформаций, возникающих во время сборки датчика, установки его на объект и в ходе эксплуатации, сохранив при этом его чувствительность к измеряемому параметру – давлению.

В ходе продолжившихся исследований решение было найдено. Оно состояло в том, чтобы соединить кристалл со стеклянным пьедесталом (рис. 7).

Был разработан специальный состав стекла, подобран метод герметичного соединения кремниевых кристаллов и стеклянных подложек – им стала электростатическая сварка, и в целом создана технология изготовления с выходом 99% чувствительных элементов, годных для использования в измерительных сенсорах. Таким образом была решена проблема хрупкости кремниевых пластинок, что позволило конструировать датчики на гибких носителях [3]; оставалось убедиться, что чувствительный элемент, помещенный на тонкую подложку – в данном случае на гибкую плату с полиимидной основой толщиной 12,5 мкм, – не будет реагировать на механические напряжения, вызванные деформацией подложки.

Ответ был получен при помощи моделирования методом конечных элементов в программной среде ANSYS, результат которого показан на рис. 8. Моделировалось распределение напряжений в сборке, состоящей (снизу вверх) из подложки – полиимидной пленки, к которой приклеен слой стекла (вертикально-горизонтальная штриховка) с приваренным к нему слоем кремния (добавлена диагональная штриховка). Нагрузка на растяжение прикладывалась к подложке, поскольку именно она первой воспринимает деформации от конструкции, на которую установлен датчик.

По цветовому отображению величины напряжений можно видеть, что напряжения максимальны по углам подложки (красный цвет) – там, где ее сечение меньше и, соответственно, сильнее деформация. В небольшой по толщине области слоя стекла, примыкающей к подложке,

напряжения уменьшаются (изменение цвета от желтого до голубого): стекло, благодаря своему аморфно-кристаллическому строению, распределяет деформацию и вызываемые ею напряжения по своему объему. Равномерный синий цвет, наблюдаемый выше этой небольшой области, означает, что механические напряжения, возникшие вследствие растяжения подложки, не затрагивают материал кристалла.

Задача была решена: беспрецедентная тензочувствительность сенсора из монокристаллического кремния превратилась из недостатка

в достоинство – в высочайшую разрешающую способность ИПД.

Выходное напряжение, сформированное на выходе мостовой схемы, легко преобразовать в стандартные сигналы: аналоговый 4–20 мА (токовая петля) или цифровые сообщения в формате протоколов HART, FOUNDATION Fieldbus или др. Следовательно, появляется возможность полученную информацию хранить, накапливать, передавать на центральные вычислительные устройства, что повышает качество и скорость обработки информации. Преобразователь выходного напряжения ЧЭ в сигнал (сообщение) стандартного протокола может быть как сформирован в нескольких дополнительных слоях кристалла чувствительного элемента, так и выполнен в виде отдельного кристалла, смонтированного на одной подложке с ЧЭ.

При моделировании толщина стеклянного пьедестала была принята равной 1,6 мм, однако, судя по результатам, ее можно уменьшить до 0,8 мм, что дает возможность

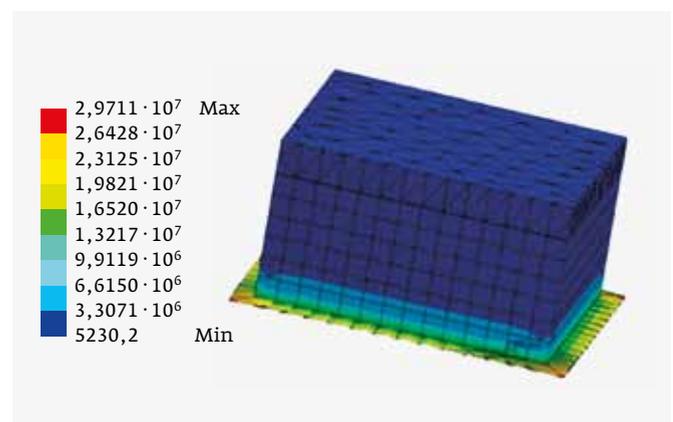


Рис. 8. Результаты моделирования реакции сборки кремниевое кристалла со стеклянным пьедесталом на растягивающие напряжения

войти в рамки приведенных выше требований к датчику давления.

Следует понимать, что монокристаллические кремниевые датчики с тензорезисторной схемой, с разной конфигурацией мембраны, могут измерять не только давление, но и деформации элементов конструкции, вибрации, механические нагружения. Развернув производство таких датчиков на гибком носителе с передачей информации по беспроводной сети связи, их можно будет с успехом использовать в распределенных системах мониторинга состояния и функционирования сложных крупномасштабных объектов: от летательных аппаратов и космических станций до трубопроводов, в том числе и для мгновенного определения наличия в них течи и ее локализации [4].

В заключение можно добавить, что, несмотря на огромные достижения кремниевых технологий, в части применения этого удивительного материала

в контрольно-измерительной технике мы находимся в начале пути, ибо пока раскрыты далеко не все его секреты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Казарян А. А.** Пленочные датчики давления. – М.: Бу-мажная галерея, 2006. 320 с.
2. **Андреев К. А., Тиняков Ю. Н., Шахнов В. А.** Математические модели гибридных чувствительных элементов датчиков давления // Датчики и системы. 2013. № 9. С. 2–9.
3. Печатные платы: Справочник / Под ред. К. Ф. Кумбза. Кн. 2. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. 1016 с.
4. **Сергеева Н. А., Цивинская Т. А., Шахнов В. А.** Контрольно-измерительные МЭМС с использованием малогабаритных чувствительных элементов из монокристаллического кремния // Датчики и системы. 2016. № 3 (201). С. 35–39.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ. СПРАВОЧНИК В 2-Х КНИГАХ

Под ред. К. Кумбза

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2020. – 2032 с.,
ISBN 978-5-94836-258-8
Т. 1. – 1016 с. Т. 2. – 1016 с.

Цена 2 600 руб.
за два тома

Шестое издание дополнено информацией по ценообразованию, количественной оценке технологичности плат, управлению производством и решению экологических проблем.

Все изменения в технологии изготовления печатных плат нашли свое отражение в этой книге, что привело к тому, что более 75% ее глав были либо исправлены, либо являются новыми, свидетельствуя, что шестое издание содержит самую последнюю информацию.

Цель книги состоит в том, чтобы предоставить нужную информацию насколько возможно в более конкретном и подробном виде, используя промышленные стандарты там, где они существуют, и передовой опыт, имеющий технологическое обоснование и продемонстрировавший свою работоспособность там, где соответствующих стандартов нет.

Справочник рассчитан на широкий круг специалистов-технологов, конструкторов, схемотехников и специалистов по надежности, поскольку печатные платы являются фундаментом проектирования и производства изделий электроники.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru