

**В Е С Т Н И К
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ОБЩЕНАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 285

Январь

2005

Серия «Физика»

Свидетельства о регистрации: бумажный вариант № 018694, электронный вариант № 018693
выданы Госкомпечати РФ 14 апреля 1999 г.

ISSN: печатный вариант – 1561-7793; электронный вариант – 1561-803X
от 20 апреля 1999 г. Международного Центра ISSN (Париж)

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК,
посвященный 50-летию организации в ТГУ научного и образовательного направлений
по физике полупроводников**

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 2

**ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
НАУЧНОГО И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЙ**

Вяткин А.П., Кривов М.А., Лаврентьева Л.Г. История организации и становления научного направления по физике полупроводников в Томском университете и Сибирском физико-техническом институте	3
Романова И.Д. Научно-исследовательскому институту полупроводниковых приборов 40 лет.....	13
Лаврентьева Л.Г., Ивонин И.В. Основные этапы развития научного направления по эпитаксии полупроводников в СФТИ.....	17
Воеводин В.Г. Лаборатория полупроводникового материаловедения СФТИ.....	24
Хлудков С.С. Становление и развитие лаборатории физики полупроводников.....	28
Вяткин А.П., Вилисов А.А. Развитие физико-технологических основ создания полупроводниковых приборов	33
Войцеховский А.В., Коханенко А.П. Высокочувствительные приемники оптического излучения	39
Мокроусов Г.М. Физико-химические аспекты электронного материаловедения.....	43
Войцеховский А.В., Гаман В.И., Гермогенов В.П., Ивонин И.В., Лаврентьева Л.Г., Мокроусов Г.М. Подготовка специалистов в области физики и техники полупроводников в Томском госуниверситете.....	47

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ (ОБЗОРЫ)

Караваев Г.Ф., Гриняев С.Н., Чернышов В.Н. Исследование электронных процессов в наноструктурах.....	53
Воеводин В.Г., Чалдышев В.А. Исследование тройных полупроводников $A^2B^4C_2^5$	63
Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д., Ивонин И.В. Газофазовая эпитаксия арсенида галлия	74
Хлудков С.С. Диффузия примесей в арсениде галлия, диффузионные структуры и приборы	84
Брудный В.Н. Радиационные эффекты в полупроводниках.....	95
Гермогенов В.П. От сплавных контактов к эпитаксиальным гетероструктурам.....	103
Гаман В.И. Электронные процессы в полупроводниковых диодах и структурах металл – диэлектрик – полупроводник.....	112
Вяткин А.П., Максимова Н.К., Филонов Н.Г. Электрофизические свойства структур с барьером Шоттки на GaAs	121
Божков В.Г., Лукаш В.С. Полупроводниковые СВЧ-приборы	129
Криворотов Н.П., Изаак Т.И., Ромась Л.М., Свинолулов Ю.Г., Щеголь С.С. Микроэлектронные сенсоры давления	139
Вилисов А.А. Светоизлучающие диоды	148
Толбанов О.П. Детекторы ионизирующих излучений на основе компенсированного арсенида галлия.....	155
Войцеховский А.В., Несмелов С.Н. Фотоэлектрические инфракрасные детекторы с управляемой спектральной характеристикой	164

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 172

РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ НА РУССКОМ И АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКАХ..... 174

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СЕНСОРЫ ДАВЛЕНИЯ

В данной статье дан краткий анализ широко распространенных микроэлектронных сенсоров давления (МСД) и описаны оригинальные разработки МСД, выполненные на основе кристаллов кремния и арсенида галлия с привлечением приемов микромеханики и нанотехнологий. Разработки имели своей целью повышение точности измерений и долговременной стабильности метрологических характеристик (емкостной МСД), расширение диапазона измерений (объемночувствительный МСД), повышение быстродействия с сохранением высокой чувствительности (мультипликативный МСД).

Процесс автоматизации операций управления и контроля, охвативший все сферы современной техники, технологии и жизнеобеспечения и ставший возможным благодаря массовому появлению относительно недорогих процессоров, вызывает к жизни всё возрастающие потребности в сенсорах (в «чувствителях» неэлектрических величин). Увеличение потребностей сопровождается ужесточением требований к стоимости, весогабаритным параметрам, качеству и функциональным возможностям сенсоров. Выполнение всех этих требований становится возможным только за счет привлечения к изготовлению сенсоров методов групповой микроэлектронной технологии. Что касается сенсоров давления, то, начиная с середины 70-х гг., мировой объем их выпуска удваивается каждые 7 лет, а объем годовой продажи в Объединенной Европе и США в 1997 г. достиг в денежном выражении \approx \$ 1 млрд [1].

1. МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СЕНСОРЫ ДАВЛЕНИЯ

Среди большого разнообразия МСД, различающихся по физическому принципу преобразования давления в электрический сигнал и по технологическому исполнению, наибольшее мировое распространение получили сенсоры, содержащие квадратную профилированную мембрану из монокристаллического кремния n -типа проводимости с пленочными тензорезисторами p^+ -типа проводимости, выполненными на периферии мембраны и соединенными в мост Уитстона (рис. 1). Широкое распространение таких МСД обусловлено высокой механической добротностью и высокой тензочувствительностью кремния, возможностью изготовления МСД групповыми методами микроэлектронной технологии и сложившимися традициями работы с мостовыми схемами выходного сигнала.

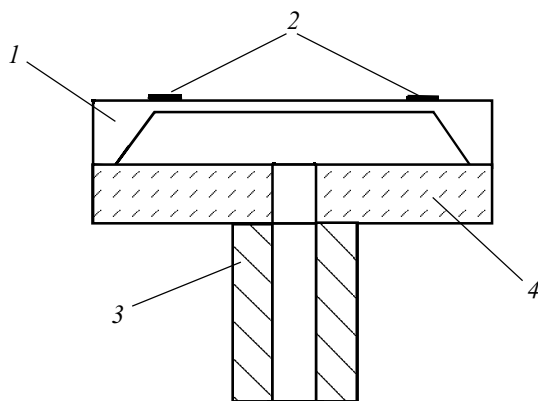


Рис. 1. Сенсор с кремниевой профилированной мембраной и тензорезисторами (вид в разрезе): 1 – квадратная профилированная мембрана из кремния n -типа проводимости; 2 – тензорезисторы p^+ -типа проводимости; 3 – трубка подвода давления; 4 – пластинка из боросиликатного стекла

Первые промышленные образцы МСД с тензорезисторами на кремниевой профилированной мембране (рис. 1) появились на рынке уже в начале 70-х гг. (разработка фирмы «Honeywell»). Однако, несмотря на, казалось бы, очевидные технические и технологические достоинства, последующее внедрение подобных сенсоров в технику измерения давлений оказалось не слишком быстрым. Так, к 1980 г. они содержались всего лишь в 5% от общего числа выпускаемых в мире датчиков давления [2], к 1985 г. – в 10%, к 1990 – в 20% и лишь к 1995 г. эта доля приближается к 50% [3]. Причины столь медленного внедрения состоят в необходимости решения трех непростых задач: обеспечения долговременной стабильности сопротивлений тензорезисторов; надежной механической коммутации кремниевой мембраны с корпусом сенсора без внесения дополнительных погрешностей измерения; надежной защиты кремниевой мембраны от агрессивного воздействия среды измерения. Первая задача решается постепенным повышением качества изоляции тензорезисторов. Вторая – подбором материалов конструкции корпуса с близкими к кремнию коэффициентами температурного расширения (КТР) либо герметизацией мембраны в корпусе с помощью эластичных и вакуумно-плотных органических компаундов. Общепринятым методом решения третьей задачи становится размещение сенсора в полости стального корпуса, изоляция полости от среды измерения пассивной коррозионно-стойкой мембраной и последующее заполнение полости электронеиutralной компрессионной жидкостью.

Вместе с ростом объемов производства наблюдается постепенное улучшение метрологических параметров МСД. Так, если до 90-х гг. большинство промышленных МСД отвечало классу точности $(0,25 \div 0,5)$ [4 – 6], то во второй половине 90-х гг. этот показатель приблизился к 0,1 [7 – 8].

В последнее десятилетие в передовых странах мира (США, Японии, Объединенной Европе, Китае и др.) нарастает число НИР и ОКР, направленных на изготовление МСД с применением совмещенной технологии микромеханики и КМОП [9 – 12]. Эта технология позволяет изготавливать на поверхности кремниевого кристалла площадью $\approx 1 \text{ мм}^2$ чувствительный к давлению элемент, термочувствительный элемент, усилитель и микроконтроллер, выполняющий функции коррекции температурных погрешностей, линеаризации и нормировки выходного сигнала. Возможность калибровки и коррекции погрешностей до операции разделения технологической пластины на дискретные приборы создает понятные преимущества микромеханическим МСД по унификации, миниатюризации и стоимости. Фирма «Lucas Nova Sensor»,

видимо, первой предложила промышленный вариант исполнения микромеханических сенсоров с КМОП-контроллером [13]. В ближайшем будущем такие МСД существенно потеснят сенсоры других типов, однако не заменят их полностью, как МСД с тензорезисторами на кремниевой профилированной мембране не заменили в полной мере другие типы сенсоров, в том числе, манометрические сенсоры [14].

Причинами, ограничивающими выпуск и применение МСД с тензорезисторами на кремниевой профилированной мембране, является ряд присущих им технологических и технических проблем.

1. Большой разброс по чувствительности к давлению, обусловленный:

- значительным разбросом в жесткости мембран из-за исходной разнотолщинности кремниевых технологических пластин и пространственной неравномерности глубокого профильного анизотропного травления этих пластин;

- геометрическим разбросом местоположений тензорезисторов относительно края мембраны из-за аппаратных погрешностей совмещения при двусторонней литографии на толстых пластинах кремния.

2. Высокая температурная зависимость исходного разбаланса моста и высокая температурная зависимость коэффициентов тензочувствительности тензорезисторов ($\approx (1 \div 2) \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$).

3. Проблема обеспечения долговременной стабильности сопротивлений тензорезисторов. Временная нестабильность данных сопротивлений вызывается [15]: случайной локализацией дефектов структуры в кремнии или в слое изоляции около тензорезистора и последующим медленным развитием этих дефектов; дрейфом подвижных ионов на внутренних (прилегающих к тензорезистору) поверхностях защитного диэлектрика; разделением зарядов в защитном диэлектрике и дрейфом ионов на его внешних поверхностях (эта нестабильность становится особенно значимой при повышенной влажности окружающей среды [16]); изменением ширины области пространственного заряда и возрастающими токами утечки через разделительный $p^+ - n$ -переход.

4. Необходимость изготовления пассивной мембраны и герметичного заполнения подмембранного объема сенсора компрессионной жидкостью, что заметно сказывается на его стоимости.

Первые два недостатка в значительной степени устраняются за счет исполнения на сенсорном кристалле нормирующего усилителя, в котором предусмотрена компенсация температурных погрешностей [17 – 19]. Борьба с долговременными нестабильностями состоит в тщательной очистке поверхности полупроводника, защитных диэлектрических слоев и компрессионной жидкости от подвижных ионов, что на практике доступно только фирмам, обладающим сверхчистой полупроводниковой технологией. Важны также тестовые испытания сенсоров по выявлению дефектных тензорезисторов (термобароциклирование, контроль вольт-амперных характеристик разделительного $p^+ - n$ -перехода и др.). В отечественных, да и в зарубежных нормативных документах не всегда предусматривается аттестация сенсоров на долговременную стабильность [20, 21]. Гарантирование такой

стабильности для зарубежных сенсоров сопровождается значительным ростом их стоимости [22] (см. каталоги и прайс-листы фирм «Fischer-Rosemaunt», «Honeywell», «Motorola», «Sensam» и др.), что связано, видимо, с дополнительными затратами на отбраковку потенциально нестабильных сенсоров по косвенным параметрам-критериям годности [23] или с затратами на дополнительные форсированные испытания по долговечности.

Третья и четвертая проблемы оправдывают не прекращающиеся разработки сенсоров с коррозионно-стойкими упругими мембранами (металлическими [24] или керамическими [25 – 27]), на поверхности которых формируются металлопленочные тензорезисторы и которые не нуждаются в пассивных мембранах. Так, отличная коррозионная стойкость керамики, возможность получения литьем монолитного керамического корпуса с тонкой мембраной [25] (рис. 2, а) и простота изготовления тензомоста (например, нанесением металлических порошков методом шелкографии с последующими спеканием и прецизионной лазерной подгонкой тензорезисторов) определяют низкую стоимость, высокую надежность и, как следствие, всё более широкий выпуск и применение керамических сенсоров [28].

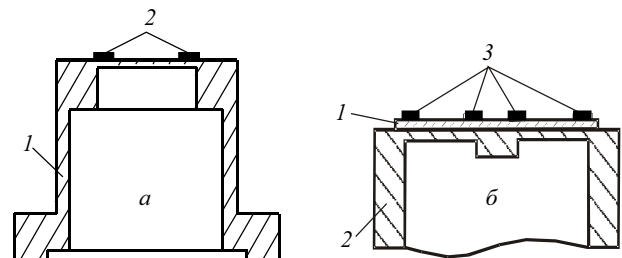


Рис. 2. Сенсоры: а – керамический (1 – монолитный керамический корпус с мембраной, 2 – металлопленочные тензорезисторы); б – выполненный по технологии КНС (1 – сапфировая подложка, связанная тонким слоем высокотемпературного серебряного припоя с мембранным торцом титанового корпуса 2; 3 – тензорезисторы из поликремния p^+ -типа проводимости)

Однако в силу малой тензочувствительности металлических резисторов (2 ÷ 4 вместо 100 ÷ 150 у кремния) выходной сигнал от металлопленочного тензомоста при напряжении питания в единицы вольт оказывается малым (единицы милливольт на диапазон измерения), что создает проблемы для многодиапазонного применения сенсоров и снижает их устойчивость к электромагнитным помехам. Высокой тензочувствительностью, долговременной стабильностью и малым температурным коэффициентом тензочувствительности сопротивления ($((1 \div 2) \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C})$) отличаются пленки p^+ -поликремния, выращенные на поверхности слоев-изоляторов кремниевой подложки (SiO_2 , Si_3N_4), или на поверхности тонких сапфировых подложек [29 – 31]. Более высокая долговременная стабильность поликремниевых тензорезисторов (по сравнению с монокристаллическими) обеспечивается двумя факторами: изоляцией тензорезисторов от мембраны слоем диэлектрика вместо $p^+ - n$ -перехода, что уменьшает токи утечек; большой плотностью поверхностных состояний поликремниевой пленки, закрепляющих

уровень Ферми и снижающих зависимость сопротивления пленки от зарядового состояния защитных диэлектриков.

В СССР и затем в России широкое распространение получили МСД, изготовленные по технологии КНС (кремний на сапфире), содержащие p^+ -полукремниевый тонкопленочный тензорезистивный мост, сформированный на тонкой сапфировой подложке (сенсоры датчиков «Сапфир 22», «Метран 43» и др.) [32 – 35]. Схематическое изображение МСД подобного типа представлено на рис. 2, б. Как и в керамическом МСД (рис. 2, а), корпус и мембрана МСД с КНС (рис. 2, б) выполнены технологически в едином процессе. Использование в качестве материала корпуса коррозионностойкого титанового сплава благоприятствует работе МСД без дополнительной пассивной мембраны. Конструкции обоих сенсоров (рис. 2, а и б) обеспечивают хорошую механическую развязку мембраны с корпусом датчика давления. Существенными преимуществами МСД с КНС перед керамическими МСД являются: больший уровень выходного сигнала (сотни милливольт на диапазон измерения), большая стойкость к перегрузкам, большая ударная прочность. К недостаткам МСД с КНС (рис. 2, б) следует отнести тот факт, что упругая мембрана содержит три слоя разнородных материалов (титановый сплав, серебряный припой, сапфировая пластина). Несмотря на близость КТР титанового сплава и сапфира, мембрана находится в механически напряженном состоянии (за счет охлаждения после сплавного процесса формирования мембраны при температуре > 900 °С). Механически напряженное состояние склонно к медленной релаксации за счет пластических деформаций в припое. Медленное развитие пластических деформаций в припое возможно также при длительном воздействии давления. Итогом таких деформаций может стать долговременная нестабильность параметров сенсора.

2. ЕМКОСТНОЙ СЕНСОР ДАВЛЕНИЯ С КРЕМНИЕВОЙ ПРОФИЛИРОВАННОЙ МЕМБРАНОЙ

Высокая точность измерения может быть получена на емкостных сенсорах, содержащих подвижную обкладку конденсатора в виде мембраны из монокристаллического кремния [36 – 38].

Потенциальные преимущества емкостных сенсоров, содержащих кремниевую мембрану, по сравнению с кремниевыми тензорезистивными сенсорами состоят в следующем (с учетом анализа авторов [37, 39]):

1. Возможность работы в условиях больших относительных изменений емкости – реально, $20 \div 40\%$ на диапазон измерения, в то время как соответствующие изменения сопротивлений кремниевых тензорезисторов, как правило, не превышают 2%. Ясно, что при, во всяком случае, не меньших возможностях современной электроники в точности измерения емкости по сравнению с точностью измерения сопротивления на емкостных сенсорах потенциально можно достичь на порядок меньшей погрешности измерения или на порядок расширить диапазон измерения давления.

2. Меньший технологический разброс по чувствительности, поскольку исключается фактор отклонения местоположений тензорезисторов относительно края мембраны.

3. Большая долговременная стабильность емкости по сравнению с полупроводниковым сопротивлением, что объясняется малыми токами утечки с емкостных электродов, изолированных друг от друга высокоомными диэлектрическими прослойками (перемычками). Кроме того, перемещение подвижного емкостного электрода под давлением является интегральной характеристикой деформаций всей площади мембраны и слабо чувствительно к локальным дефектам кремния.

4. Малое энергопотребление и малый саморазогрев мембранного блока.

5. При удачном подборе материалов конструкции емкостного сенсора по КТР его температурные погрешности могут быть снижены до уровня 10^{-5} 1/°С.

К недостаткам емкостных сенсоров следует отнести высокую нелинейность выходного сигнала, наличие паразитных емкостей и более высокую по сравнению с тензорезистивными сенсорами чувствительность к электромагнитным наводкам. Эти недостатки вызвали известную осторожность потребителей к емкостным сенсорам. Однако с повышением качества микроэлектронных комплектующих и расширением выпуска относительно недорогих микропроцессоров к середине 80-х гг. эта осторожность сменяется растущим числом разработок и всё более широким выпуском емкостных сенсоров [40]. Согласно, например, оценке [41] в 90-е гг. доля емкостных сенсоров среди общего числа европейского рынка сенсоров давления возросла за семь лет примерно в два раза.

Выполненная нами оригинальная разработка емкостного сенсора разности давлений (рис. 3) преследовала три основные цели [42, 43]:

- достижение высокой механической добротности деформирующихся частей сенсора;
- снижение влияния температуры на емкость сенсора и её зависимость от давления;
- уменьшение паразитных емкостей.

Первая цель достигалась исполнением подвижной обкладки в виде мембраны из толстой (500 мкм) глубоко профилированной (до толщины гибких участков $10 \div 40$ мкм) пластины монокристаллического кремния, периферия которой усилена столь же толстыми кремниевыми рамками. (Здесь уместно заметить, что отказ от профилирования и монокристалличности мембран в микромеханической технологии изготовления сенсоров [13] чреват заметным снижением качества их тензоэлектрических характеристик [44].) Вторая цель – исполнением неподвижных обкладок конденсатора из пластин боросиликатного стекла с близким к кремнию КТР и механической развязкой мембранного блока с корпусом сенсора посредством герметизации первого во втором тонком слоем эластичного кремнийорганического компаунда. Третья – заменой известного метода сплошной коммутации неподвижных обкладок с периферией мембраны посредством тонких слоев изолятора [45] на их коммутацию с локальными выступами мембраны. В разработке также преследовалось целью придать сенсору

высокую конструктивную симметрию для подавления синфазной электромагнитной наводки.

Мембрана с жестким центром 1 (рис. 3, а) получена двухсторонним анизотропным травлением пластины кремния *n*-типа проводимости. Высота восьми выступов 2 задает исходные ширины емкостных зазоров ≈ 10 мкм. На обе стороны мембраны напылены: по периферии – тонкие (≈ 2 мкм) пленки боросиликатного стекла 3; на жесткий центр – слой металлизации 4 ($\approx 0,1$ мкм). Металлизация центра продлена узкой дорожкой до периферии мембраны (рис. 3, а), где осуществляется приварка микропроволочных электровыводов. На обеих сторонах центральных участков стеклянной пластины 5 (рис. 3, б) сформированы металлизированные площадки 6, соединенные друг с другом металлизированной дорожкой через боковую поверхность пластины. Мембранный блок (рис. 3, в) содержит мембрану 1, две кремниевые рамки 7, сформированные сквозным анизотропным травлением кремниевых пластин, и две стеклянные пластины 5. Сначала в вакууме проводится сплавление рамок с периферией мембраны

при температуре размягчения стеклянных слоев 3 (700 °С) под сжимающей нагрузкой 5 кГ/см². Затем выполняется электростатическая сварка стеклянных пластин 5 с выступами мембраны 2 [46] (1000 В, 400 ÷ 450 °С). После этого к металлизированным дорожкам на кремниевой мембране и к металлизированным площадкам на стеклянных пластинах привариваются микропроволочные электровыводы 8.

Мембранный блок (рис. 3, в) герметично упаковывается в стальном корпусе датчика давления силиконовым компаундом [42, 43]. Микропроволочные электровыводы 8 предназначены для соединения четырех обкладок двух конденсаторов, образованных слоями металлизации жесткого центра мембраны и стеклянных пластин, с электрогермовводами корпуса. Разность давлений, действующих по обе стороны мембранного блока, изгибает мембрану, вызывая увеличение одной из емкостей и уменьшение другой, что и служит сигналом разности давлений.

Метрологические характеристики емкостного сенсора отвечают классу точности 0,1 [42, 43].

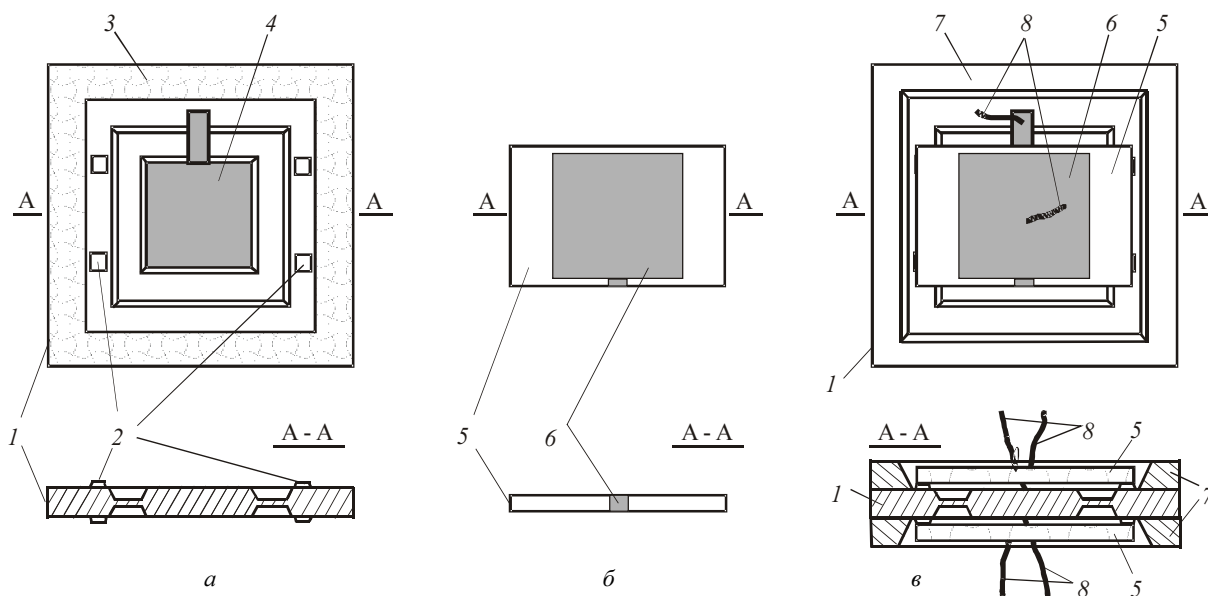


Рис. 3. Емкостной сенсор разности давлений: а – мембрана (вид сверху или снизу); б – стеклянный электрод (вид сверху или снизу); в – мембранный блок (вид сверху или снизу); 1 – кремниевая мембрана с выступами 2; 3 – пленка боросиликатного стекла; 4 – металлизация мембраны; 5 – пластина боросиликатного стекла с металлизацией 6; 7 – кремниевые рамки; 8 – микропроволоки

3. ОБЪЕМНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ СЕНСОР ДАВЛЕНИЯ

Рассмотренные выше МСД содержат упругий элемент в виде мембраны, деформирующейся под давлением, и чувствительный элемент, электрическая характеристика которого реагирует на деформацию или перемещение мембраны. К недостаткам мембранных МСД можно отнести малое быстродействие и узкий диапазон измерения.

В области измерения высоких давлений возможно использование в качестве чувствительного элемента сплошного твердого тела, электрическая характеристика которого реагирует на всестороннее сжатие. При высокой чувствительности к всестороннему сжатию отпадает необходимость в изготовлении упругой мембраны, что упрощает технологию

изготовления сенсора и обеспечивает возможность измерения давлений в широких амплитудных и частотных диапазонах.

В качестве объемочувствительных элементов (ОЧЭ) перспективным выглядит применение твердых растворов AlGaAs и туннельных диодов [47, 48].

Впервые возможность применения твердых растворов AlGaAs для измерения давлений показана в работах [49, 50]. Авторами данных работ исследованы варизонные эпитаксиальные пленки Al_xGa_{1-x}As *n*-типа проводимости с составами $x = 0,3 \div 0,45$. Предполагалось, что высокая чувствительность электросопротивления этих пленок к всестороннему сжатию (высокая барочувствительность) обусловлена пространственным перемещением в пленке Г–Х-перехода. Более точное понимание барочувствительности твердых

растворов $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ включает в рассмотрение DX состояния донорной примеси. Оказалось, что высокую барочувствительность проявляют твердые растворы с меньшим содержанием AlAs. В частности, в патенте [51] предлагается использовать составы с $x = 0,25 \div 0,33$. Наши исследования [52] показывают, что наилучшие результаты по временной стабильности, термостабильности и барочувствительности дают вырожденные эпитаксиальные пленки с ещё меньшим содержанием AlAs: $x = 0,17 \div 0,22$.

На рис. 4 изображен кристалл полуизолирующего арсенида галлия с пленочными барорезисторами из AlGaAs, предназначенный для работы в составе МСД [53]. На поверхности кристалла 1 в едином технологическом процессе жидкофазной эпитаксии выращены два слоя твердого раствора $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ с электронным типом проводимости: сначала буферный слой 4 с концентрацией свободных электронов $n < 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (при $300 \text{ }^\circ\text{C}$), затем рабочий слой 5 с $n \sim 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Методами химического травления и фотолитографии из эпитаксиальных слоев сформированы барорезисторы 2. Металлизированные площадки 3 (эвтектика AuNiGe) играют роль омических контактов к барорезисторам. Кристаллы с парой барорезисторов (рис. 4) получены лазерным скрайбированием полуизолирующей подложки арсенида галлия.

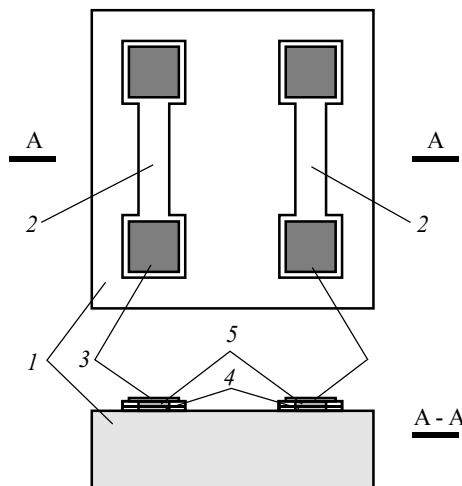


Рис. 4

Практическое применение кристалла в качестве ОЧЭ требует решения двух проблем.

1. Для обеспечения всесторонности сжатия кристалл должен быть погружен в компрессионную жидкость. Нежелательна его пайка (клейка) к корпусу, как это сделано в [51], во избежание развития контактных механических напряжений. Недопустимо также подвешивание кристалла на длинных микропроводах, как это сделано в [54], из-за резкого снижения вибростойкости сенсора.

2. При формировании моста Уитстона из четырех барорезисторов необходимо обеспечить термостабилизацию его разбаланса.

В предложенном нами техническом решении [55] достигнуты:

- высокая устойчивость сенсора к внешним механическим воздействиям;

- полная механическая развязка кристалла с корпусом датчика давления;

- глубокая компенсация нулевого разбаланса моста Уитстона, формируемого из четырех барорезисторов на двух кристаллах, и эффективная температурная стабилизация разбаланса моста.

Оригинальный МСД содержит (рис. 5): полуизолирующий кристалл GaAs 1 (рис. 4) с барорезисторами 2; керамическую пластинку 3 с выемкой в центре; восемь контактных площадок (четыре у выемки 4 и четыре на периферии пластины 5); четыре металлопленочные дорожки (две из металла со слабой зависимостью сопротивления от температуры 6 и две – из термочувствительного металла 7), соединяющих площадки у выемки с периферийными площадками; эластичные кремнийорганические перемычки 8, фиксирующие кристалл 1 в выемке; микропроводами 9, соединяющие омические контакты барорезисторов с контактными площадками 4; микропроводами 10, предназначенные для соединения периферийных контактных площадок 5 с электродами электрогермоввода датчика давления [56].

Лазерной подгонкой сопротивлений металлизированных дорожек 6 и 7 минимизированы исходный разбаланс моста из четырех барорезисторов и температурная зависимость разбаланса [56].

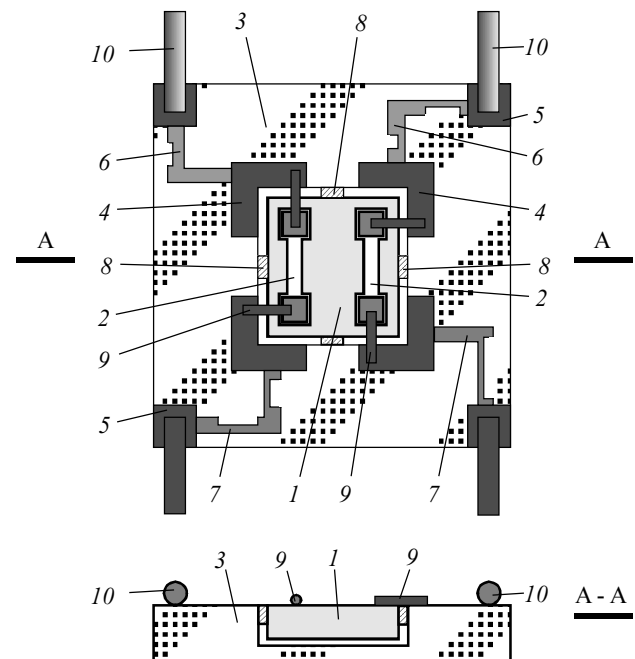


Рис. 5. Сенсор давления с объемно-чувствительным элементом (вид сверху и сбоку)

В сенсоре (рис. 5) кристалл GaAs окружен компрессионной жидкостью, заполняющей зазоры между стенками выемки и поверхностью кристалла, что создает идеальные условия для всесторонности сжатия и исключает развитие в нем анизотропных механических напряжений. Керамическая же пластинка, благодаря высокой прочности на сжатие, способна (в отличие от полупроводникового кристалла [51]) выдерживать высокие анизотропные давления, будучи припаянной (припаянной) к стенке корпуса датчика. Вертикальная ориентация микропроводов 9 способствует

снижению термонапряжений в кристалле, возникающих из-за разницы КТР керамики и арсенида галлия, ибо действие термомеханической силы на кристалл со стороны каждой микропроволоки ослабляется изгибом соседних микроволокон поворотом кристалла в выемке. Узкие зазоры обеспечивают быстрый теплообмен между кристаллом, керамикой и корпусом, что снижает адиабатическую погрешность измерения. Высокое сопротивление керамики обеспечивает отличную гальваническую развязку барорезистивного моста с корпусом датчика давления.

Два сенсора (рис. 5) могут приклеиваться тыльной стороной керамической пластины к противоположным стенкам жесткой перегородки корпуса датчика давления, отделяющей объем измерения давления от атмосферы и снабженной электрогермоводами высокого давления [56]. Изолированные электроды электрогермоводов припаиваются к периферийным контактным площадкам двух МСД (рис. 5) так, чтобы четыре барорезистора образовали мост Уитстона, в котором барорезисторы, размещенные в зоне измеряемого давления, оказываются в противоположных плечах моста. Давление вызывает рост сопротивления барорезисторов противоположных плеч, что приводит к разбалансу моста.

Все операции по сборке МСД могут быть реализованы на стандартном технологическом оборудовании при полной автоматизации процессов сборки, что обеспечивает низкую себестоимость сенсора.

Одним датчиком давления с объемночувствительными МСД (рис. 5) могут быть перекрыты 11 стандартных диапазонов измерения (4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160; 250; 400 МПа), что недоступно мембранным датчикам. Неоспоримо преимущество датчиков с объемночувствительными МСД в сравнении с мембранными датчиками давления по безопасности применения, поскольку прочность корпуса и электрогермоводов к воздействию высоких давлений может быть повышена вплоть до 1 ГПа.

4. МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЙ СЕНСОР ДАВЛЕНИЯ

Для безмембранных сенсоров с ОЧЭ характерны широкий диапазон измерения и высокое быстродействие. Однако в области давлений <1 МПа выходной сигнал с ОЧЭ становится столь малым, что начинает тонуть в шумах и наводках. Существенное повышение чувствительности без заметного снижения быстродействия может быть достигнуто при построении сенсоров по так называемому мультипликативному принципу преобразования давления в выходной электрический сигнал.

Впервые мультипликативный принцип построения сенсора давления был предложен сотрудниками центра научных исследований в области электроники NASA (Кембридж, Массачусетс [57]). Сенсор Ринднера и соавторов [57] содержит металлокерамический корпус СВЧ-диода, в котором смонтирован меза- $p^+ - n^+$ -переход из арсенида галлия (рис. 6, а). Над «мезой» сформирован конусный элемент из жесткого эпоксидного компаунда, удерживаемый над «мезой» заливочным эластичным компаундом. Дав-

ление, действующее на основании конусного элемента, передается на $p^+ - n^+$ -переход малой площади, по изменению тока которого судят о давлении. Сенсор характеризуется высоким быстродействием (полоса рабочих частот – сотни килогерц) и имеет миниатюрные габариты (линейные размеры сенсора ≈ 1 мм).

В сверхминиатюрном сенсоре с эпитаксиальным меза- $p^+ - n^+$ -переходом из арсенида галлия [58], разработанном сотрудниками СФТИ (рис. 6, б), узкий зазор между расширенным металлическим электродом и полупроводниковой подложкой заполнен эластичным компаундом. Благодаря тому, что диаметр электрода много больше диаметра меза-структуры и компаунд препятствует проникновению давления к боковой поверхности меза-структуры из-за сил его адгезионного сцепления с поверхностью электрода и подложки, достигается значительная концентрация давления на $p^+ - n^+$ -переход. Сенсоры с жесткими концентраторами [57, 58] могут применяться как для измерения быстропеременных, так и медленно меняющихся давлений. Однако точным измерениям статических давлений такими сенсорами препятствует низкая механическая добротность органических компаундов, входящих в состав концентраторов давления.

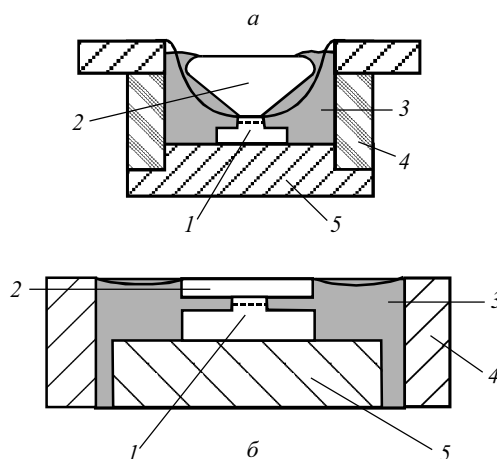


Рис. 6. Мультипликативные сенсоры: а – сенсор [57]: 1 – кристалл GaSb с меза- $p^+ - n^+$ -переходом (обозначен пунктиром), 2 – концентратор давления, 3 – органический наполнитель, 4 – металлокерамический корпус, 5 – кристаллодержатель; б – сенсор [58]: 1 – кристалл GaAs с меза- $p^+ - n^+$ -переходом, 2 – электрод, 3 – органический наполнитель, 4 – металлическая стенка корпуса, 5 – кристаллодержатель

Разработанный нами мультипликативный сенсор давления отличается от известных аналогов простотой технологии изготовления, низкой стоимостью и пригодностью для точных измерений как статических, так и быстропеременных давлений [59, 60].

Сенсор содержит (рис. 7) кристалл кремния n -типа проводимости толщиной 0,5 мм и размерами 0,7 мм \times 1,0 мм (пунктирами обозначены плоскости скрайбирования технологической пластины на такие кристаллы) с выступами в виде двух рамок и восьми площадок, соединенных дорожками с рамками. Одна из рамок замкнута, другая имеет разрывы (рис. 7, а). В объеме выступов-рамок содержатся четыре тензорезистора p^+ -типа проводимости (на рис. 7 изображены в виде темных дорожек), выполненных попарно в ка-

ждой рамке-выступе. На участки площадок p^+ -типа проводимости нанесены пленки алюминия, служащие омическими контактами к p^+ -тензорезисторам (рис. 7). К омическим контактам привариваются микропроволочные электровыводы (на рис. 7 не изображены). Методом электростатической сварки в вакууме к выступам рамок присоединены пластины боросиликатного стекла, согласованного с кремнием по коэффициенту температурного расширения (рис. 7, б). Полость, замкнутая кристаллом, сплошной рамкой-выступом и верхней стеклянной пластиной (рис. 7, б),

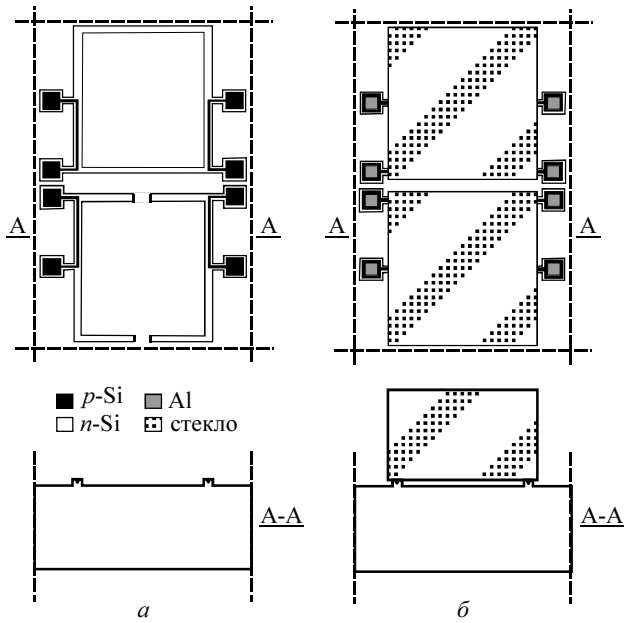


Рис. 7

изолирована от среды давления. Измеряемое давление, действующее на верхнюю стеклянную пластину, мультипликативно сжимает расположенную под ней рамку-выступ меньшей площади и вызывает изменение электрического сопротивления двух верхних тензорезисторов вследствие эффекта поперечного пьезосопротивления p^+ -кремния. В то же время сопротивления двух нижних тензорезисторов не изменяются с давлением, поскольку среда измерения проникает под нижнюю стеклянную пластину (рис. 7, б) через разрывы в нижней рамке-выступе (рис. 7, а). Если четыре тензорезистора соединить посредством микропроволочных электровыводов в мост Уитстона так, чтобы два верхних тензорезистора (рис. 7, а) оказались в его противоположных плечах, то разбаланс моста становится зависимым от давления. Технология изготовления МСД (рис. 7) основана на стандартных операциях групповой планарной технологии кремниевых приборов, что способствует его низкой стоимости. Отсутствие низкодобротных материалов в конструкции МСД обеспечивает его применимость для точных измерений статического давления. Возможность задания геометрических размеров выступов-рамок с фотолитографической точностью дает хорошую технологическую воспроизводимость МСД по чувствительности к давлению, а высокая жесткость мультипликатора обеспечивает его высокое быстродействие. Вариацией размеров выступа легко варьируется чувствительность МСД к давлению.

Резонансная частота механического мультипликатора (в представлении стеклянной пластины грузом, а кремниевого выступа пружиной) без учета потерь колебательной энергии на трение в окружающей среде и на внутреннее трение определяется соотношением $\nu_r = (1/2\pi) (G / m)^{1/2}$. Здесь: m – масса пластины, задаваемая её плотностью (≈ 3 мг/мм³) и объемом ($0,40 \times 0,40 \times 0,5$ мм³); G – жесткость выступа-дорожки, определяемая соотношением $G = (E_{ю} \times s) / (h \times K)$, где h – высота выступа-дорожки ($h = 1,5$ мкм). Для указанных выше размеров мультипликатора имеем $\nu_r \approx 700$ кГц. Учитывая тот факт, что частоты собственных резонансных колебаний стеклянной пластины и кремниевого кристалла выше ν_r и что мультипликатор обладает достаточно высокой механической добротностью, можно говорить о возможности применения МСД для измерения давлений в диапазоне частот от статики до $300 \div 400$ кГц.

Высокое быстродействие мультипликативных сенсоров (рис. 7) подтверждают испытания на воздействие ударных давлений в аэродинамической трубе. С целью эффективного подавления собственных резонансных колебаний мультипликатора, возникающих при воздействии фронта ударной волны, полость между стеклянной пластиной и кристаллом, содержащая разрывы в выступе-рамке (рис. 7), заполнялась вспененным силиконовым эластомером. Композиция для получения эластомера включает низкомолекулярный полиорганосилоксан, катализатор отверждения и порообразователь в виде высокодисперсного порошка. В качестве порообразователей используются материалы, разлагающиеся при нагревании с выделением газообразных продуктов. Если проводить процесс вспенивания эластомера газом, выделяющимся при разложении порообразователя таким образом, чтобы этот процесс совпадал с процессом конденсации и заканчивался ко времени отверждения силиконового каучука, можно получить пенопласт ячеистой структуры. Присутствие ячеистых газонаполненных структур в объеме эластомера уменьшает время релаксации системы, что приводит также к существенному уменьшению гистерезисных явлений, возникающих в процессе быстрых деформаций.

На рис. 8 представлены осциллограммы выходного сигнала двух сенсоров (рис. 7) на воздействие скачка давления в ударной трубе (сенсоры располагались на небольшой дистанции друг от друга вдоль оси трубы). Видно, что длительность фронта нарастания давления не превышает 2 мкс.

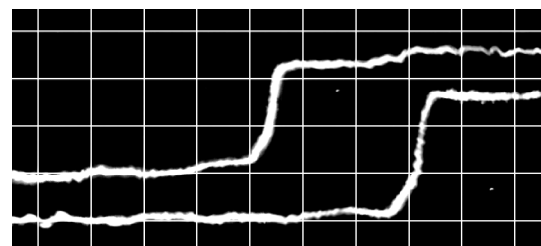


Рис. 8. Осциллограмма выходного сигнала двух сенсоров на воздействие скачка давления амплитудой 0,07 МПа (одно деление по горизонтали – 2,5 мкс)

ЛИТЕРАТУРА

1. Слепов В.И. Европейский рынок датчиков давления // Приборы и системы управления. 2001. № 3. С. 55 – 57.
2. Andrian P., Vella E. Soaring sales of silicon sensors // Sensor Rev. 1989. V. 9. No. 1. P. 33 – 36.
3. Стучебников В.М. Микроэлектронные датчики за рубежом // Приборы и системы управления. 1993. № 1. С. 18 – 21.
4. Marktanalyse: Messumformer für Druck und Druckdifferenz // Automatisierungstechn. Prax. 1985. Bd. 27. N 2. S. 57 – 63.
5. Sato Katsuya. Малогабаритные датчики давления серии FP 101 // Кейсоку гидзюцу = Instrum. and Autom. 1989. V. 17. No. 11. P. 62 – 67.
6. Drucksensoren // Techn. Mess. 1992. V. 59. No. 9. P. 372.
7. Bond A. Pressure transmitters // Contr. and Instrum. 1996. V. 28. No. 3. P. 41 – 42.
8. Pressure sensor // Hydraul. and Pneum. 1998. V. 51. No. 11. P. 76.
9. Mastrangelo C.H., Xia Zhang Tang, William C. Surface-machined capacitive differential pressure sensor with lithographically defined silicon diaphragm // Microelectromech. Syst. 1996. V. 5. No. 2. P. 98 – 105.
10. Розенблат М.А. Микротроника – новое направление развития датчиков и исполнительных устройств // Приборы и системы управления. 1996. № 12. С. 49 – 57.
11. Eaton W.P., Smith J.H. Micromachined pressure sensors // Smart Mater. and Struct. 1997. V. 6. No. 5. P. 530 – 539.
12. Medler A., Patel C., Bucher J. A Capacitive pressure sensor fabricated by a combination of SIMOX (SOI) substrates and novel etching techniques // J. Commun. 1996. V. 47. No. May. P. 6 – 8.
13. The Lucas Novasensor P4100 digital compensated pressure transduces // Electron. Compon. News. 1995. V. 39. No. 7. P. 127 – 131.
14. Сеинолупов Ю.Г., Кузнецов А.А. Компьютерная измерительная система в технологическом процессе производства манометров // Труды Всерос. науч.-техн. конф., посв. 40-летию ТУСУРа. Т. 2. Томск, 2 – 4 окт. 2002. С. 51 – 53
15. Gerlach G., Sager K., Zwiebber R. Der Einfluß halbleiter technologisch realisierbarer Passivierung – Konzepte auf die elektrische Stabilität piezoresistiver Drucksensoren // VD – Ber. 1992. Bd. 960. N 1. S. 281–294.
16. Nakladan A., Sager K., Gerlach G. Influences of humidity and moisture on the long-term stability of piezoresistive pressure sensors // Measurement. 1995. V. 16. No. 1. P. 21 – 29.
17. Датчики и преобразователи давления фирмы Sensym // Chip News. 1997. № 11 – 12. С. 16.
18. Датчики давления MOTOROLA // Chip News. 1999. No. 9. P. 24 – 25.
19. Зимин В.Н., Данилова В.В., Панков В.В., Шабратов Д.В. Базовые конструкции интегральных тензопреобразователей на ряд давлений от 0,01 до 40 МПа // Датчики и системы. 1999. № 2. С. 52 – 55.
20. Раков В.А., Тимошенко В.Г. Точный емкостной измеритель давления // Приборы и системы управления. 1993. № 4. С. 27 – 28.
21. Ушаков Л.В., Фетисов Ф.В. Датчики давления сер. «Метран» // Приборы и системы управления. 1999. № 12. С. 30.
22. Соколов Л.В., Школьников В.М. Временная стабильность интегральных датчиков как важнейшее условие их применения в авиационных микропроцессорных системах // Измерительная техника. 2002. № 10. С. 27 – 29.
23. Михайлов П.Г. Разработка и исследование методов и средств диагностики элементов и структур микроэлектронных датчиков // Приборы и системы управления. 2002. № 10. С. 45 – 47.
24. Dickschicht auf Edelstahl // Elek. Anz. 1992. Bd. 45. N 11. S. 60 – 61.
25. Drucksensor / Патент ФРГ DE 3907202 (Z 1, T 6) G01L 9/04, 20.09.90.
26. Drucksensoren // Techn. Mess. 1994. Bd. 61. N 3. S. 139.
27. Keramikzellen – Druckmessumformer // Technica (Suisse). 1998. Bd. 47. N 19. S. 53.
28. Слепов В.И. Европейский рынок датчиков давления // Приборы и системы управления. 2001. № 3. С. 55 – 57.
29. Лурье Г.И., Стучебников В.М., Хасанов В.В. Использование структур КНС в низкотемпературных датчиках давления // Приборы и системы управления. 1981. № 9. С. 20 – 21.
30. Obermeier E. Polysilicon layers lead to new generation of pressure sensor // «Transducers' 85: Int. Conf. Solid-State Sens. and Actuat., 1985, Dig. Techn. Pap.». New York, 1985. P. 430 – 433.
31. Гридчин В.А., Любимский В.Н., Сарина М.П., Бердинский А.С. Особенности проектирования поликремниевых интегральных тензопреобразователей // Приборы и системы управления. 1993. № 5. С. 21 – 24.
32. Лурье Г.И., Мартыненко В.Т. Новое поколение полупроводниковых датчиков теплоэнергетических параметров // Приборы и системы управления. 1996. № 4. С. 26 – 28.
33. Богуи М.В., Шатуновский О.В., Левицкий Ю.Е. и др. Пьезорезистивные датчики давления и силы // Зарубежная радиоэлектроника. 1996. № 9. С. 70 – 71.
34. Бушев В.В., Николайчук О.Л., Стучебников В.М. Серия микроэлектронных датчиков давления МИДА // Датчики и системы. 2000. № 1. С. 21 – 27.
35. Ушаков Л.В., Юровский А.Я., Фетисов А.В. Опыт разработки и эксплуатации датчиков перепада давления «Метран-43Ф-ДД» на базе «сухих» измерительных узлов // Датчики и системы. 2000. № 11 – 12. С. 18 – 20.
36. Peterson K.E. Silicon as a mechanical material // Proc. IEEE. 1982. V. 70. No. 5. P. 420 – 457.
37. Blasquez G., Pons P., Boukabache A. Capabilities and limits of silicon pressure sensors // Sens. and Actuators. 1089. V. 17. No. 3. P. 387 – 403.
38. Masayoshi E., Shaichi Sh., Yosinori M., et al. Capacitive pressure sensor // Trans. Instr. Electron., Inform. and Commun. Eng. 1996. V. 73. No. 2. P. 91 – 98.
39. Артемов В.М., Кудряшов Э.А., Левшина Е.С., Моисейченко В.С. Пути совершенствования емкостных датчиков давления и ускорения // Приборы и системы управления. 1989. № 9. С. 7 – 8.
40. Homburg D., Reiff E. Druckmessumformer für den rauchen Industrialltag // Elektronikpraxis. 1989. Bd. 24. N 21. S. 110 – 113.
41. Drucksensoren an der Spitze // Produktion. 1996. N 27. S. 4.
42. Ivanov E., Izaak T., Svinolupov Yu. The capacitance sensor of differential pressure // The 16th Conf. On Solid-State Transducers «EUROSENSOR XVI», Sept. 15 – 18, 2002, Prague. P. 777 – 778.
43. Иванов Е.В., Изаак Т.И., Криворотов Н.П. и др. Полупроводниковые сенсоры высоких, низких и быстропеременных давлений // Материалы 8-й Российской конф. «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения III – V». Томск, 1 – 4 окт. 2002. С. 298 – 301.
44. Yang Tian You, Lu Yan Chong, et al. // IEEE Instr. Means Techn. Conf. 1989: Conf. Rec. No. 4. P. 559 – 562.
45. Beeby S.P., Stuttle M., White N.M. Design and fabrication of a lowcost microengineered silicon pressure sensor with linearised output // IEEE Proc. Sci. Meas. and Technol. 2000. V. 147. No. 3. P. 127 – 130.
46. Wallis G., Pomeranz D. Field assisted glass-metal sealing // J. Appl. Phys. V. 40. No. 10. P. 3946 – 3949.
47. Криворотов Н.П., Вяткин А.П., Щеголь С.С. Туннельные диоды для измерения давлений // ПТЭ. 1977. № 2. С. 226 – 227.
48. Вяткин А.П., Криворотов Н.П., Щеголь С.С. Эпитаксиальные туннельные диоды на основе арсенида галлия, легированного германием. // Тез. докл. IV-го Всес. совещ. по исследованию арсенида галлия. Томск, 19 – 21 сент. 1978. С. 56.
49. Матулёнис А.Ю., Пожела Ю.К., Царенков Б.В. и др. Электропроводность варизонных кристаллов Ga_{1-x}Al_xAs // ФТП. 1973. Т. 7. № 3. С. 591 – 593.
50. Juciene V., Matulionis A., Pozela J. Shift of Г-X junction due to hydrostatic pressure // Sol. St. Comm. 1973. V. 13. No. 4. P. 453 – 455.
51. European Patent 0 335793 A1, МК G01L 9 00, G01L 19/04, Number of depot: 894008648, Date of depot: 29.03.89. Capteur de pression a semi-conducteur. / Mosser V., Robert J.L., Monod J.Y.
52. Гриняев С.Н., Щеголь С.С., Криворотов Н.П. Тензоэлектросопротивление эпитаксиальных пленок Al_xGa_{1-x}As n-типа проводимости // Материалы 7-й Российской конф. «Арсенид галлия (GaAs-99)». Томск, 21 – 23 окт. 1999. С. 27 – 29.

53. Криворотов Н.П., Свинолулов Ю.Г., Хан А.В., Щеголь С.С. Интегральный тензопреобразователь давления с объемночувствительным элементом из AlGaAs // Труды IV Междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения – АПЭП-98». Т. 4. Новосибирск, 23 – 26 сент. 1998. С. 26 – 28.
54. Бертонас К.Э., Колтаков В.К., Кудряшов Э.И. и др. Полупроводниковые датчики давления на основе кристаллов $Al_xGa_{1-x}As$ // Приборы и системы управления. 1988. № 1. С. 24 – 26.
55. Пат. РФ № 2141103 МКИ G 01 L 9/00, 9/04 от 10.11.99. Чувствительный элемент датчика давления / Криворотов Н.П., Свинолулов Ю.Г., Хан А.В., Щеголь С.С. Бюл. № 31.
56. Krivorotov N. P., Svinolupov Yu. G., Chan A. V., Schegol S.S. The integrated pressure sensor with AlGaAs-baroresistor // Mat. 4 th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings. «APEIE-98». Novosibirsk, 23 – 26 sept. 1998. V. 1. IEEE 0-7803-4938-5/981998. P. 153 – 155.
57. Pat. USA № 3686542, H01L 11/00, 15/00, 22.09.72. Miniature electromechanical tunnel diode transducer / Rindner W., Jannini A., Garfein A.
58. Вяткин А.П., Криворотов Н.П., Щеголь С.С. Высокочувствительный быстродействующий датчик давления с туннельным диодом // ПТЭ. 1988. № 1. С. 186 – 188.
59. Krivorotov N.P., Svinilupov Yu.G., Izaak T.I., Vychkov V.V. Diaphragmless pressure sensor // Sensors and Actuators. V. A 113. 2004. P. 350 – 354.
60. Свинолулов Ю.Г., Изаак Т.И. Кремниевые сенсоры давления емкостного и мультипликативного типа // Приборы. 2004. № 8 (50). С. 37 – 42.