УДК 531.781.2 DOI: 10.17587/nmst.21.368-376

Д. М. Пригодский, вед. инж.-исследователь, e-mail: dprigodskyi@gmail.com,
М. В. Басов, инж.-технолог I кат., e-mail: basov.vniia@gmail.com,
ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова", г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАВЛЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

Поступила в редакцию 01.02.2019

Исследована конструкция кремниевого чувствительного элемента давления с упорами, обеспечивающая стойкость к многократным перегрузкам. Доказано преимущество использования предложенного упора при перегрузочном давлении, в котором требуемое расстояние для хода мембраны кристалла определяется зазором, образованным толщиной прецизионно нанесенного припойного стекла. Приведены результаты исследований тензомодулей с повышенной прочностью с номинальным давлением в диапазоне 1,6...25 кПа, имеющих пятикратное повышение прочности в сравнении со стандартной конструкцией тензомодуля.

Ключевые слова: *чувствительный элемент давления, тензорезистивная мостовая схема, перегрузочная способность, упоры, температурный коэффициент нуля, температурный гистерезис нуля, метод конечных элементов*

Введение

Повышение прочностных свойств первичных преобразователей давления является актуальной задачей при разработке датчиков давления [1—6], особенно для измерения малых давлений от 1 кПа, когда самый хрупкий элемент чувствительного элемента давления (кремниевая мембрана) подвергается значительным перегрузкам как во время сборки корпусного исполнения датчиков, так и при вводе в эксплуатацию устройства. Исследуемая конструкция чувствительного элемента давления (ЧЭД) с повышенной стойкостью к перегрузочному давлению включает в себя профилированный кремниевый кристалл с тензорезистивной мостовой измерительной схемой, верхнюю крышку с упором (верхний упор), прокладку с упором (нижний упор) и основание. Мембрана кристалла, сформированная анизотропным жидкостным травлением, имеет квадратную форму со сложно профилированной геометрией концентраторов механических напряжений (МН) в виде жестких центров. Все детали ЧЭД выполняются из кремния и соединяются низкотемпературным припойным стеклом [7], хотя в литературе известны иные способы соединения [8—10]. При подаче перегрузочного давления на ЧЭД мембрана кремниевого кристалла упирается в ограничитель: при подаче давления со стороны мембраны планарная часть кристалла касается верхнего упора; при подаче давления со стороны планарной части кристалла жесткие центры мембраны касаются нижнего упора. При этом расстояния между мембраной кристалла и упорами должны обеспечивать свободный изгиб мембраны кристалла при номинальном давлении. Указанные расстояния регулируются толщиной шва припойного стекла. Такая конструкция наиболее технологична при изготовлении и с помощью автоматизации процесса нанесения позволяет с достаточной точностью и повторяемостью наносить припойное стекло на упоры [11]. Некачественная технология нанесения может привести к попаданию припойного стекла на лицевую или профилированную стороны кристалла, критичные области прокладки и верхнего упора. Данный недостаток может привести к преждевременной посадке на упоры или возникновению паразитных МН, что в конечном итоге может являться причиной повышения основных и дополнительных погрешностей преобразователя давления [12, 13].

Существуют альтернативные решения для повышения прочности путем использования сверхчувствительной схемы на основе биполярного тензотранзистора [14—16], позволяющие в перспективе добиться повышенной прочности ЧЭД без использования упоров при соблюдении ряда условий. Однако данная задача крайне непростая, и в настоя-

щее время работа по созданию и исследованию кристалла датчика давления продолжается.

Конструкция ЧЭД с повышенной прочностью

Верхним упором от механических перегрузок выступает кремниевая деталь, которая крепится к кристаллу симметрично по четырем сторонам. Верхний упор имеет площадь меньшую, чем кристалл для присоединения к контактным площадкам.

Нижним упором от механических перегрузок является кремниевая прокладка с встроенными ограничителями. Ограничители интегрированы в кремниевую прокладку и изготавливаются вместе с ней в одном процессе методом анизотропного травление кремния (рис. 1). Благодаря такому оптимальному решению, в сравнении со стандартной конструкцией ЧЭД [17], конструкция прокладки с упорами имеет прочность в 10 раз выше при воздействии планарной части кристалла.

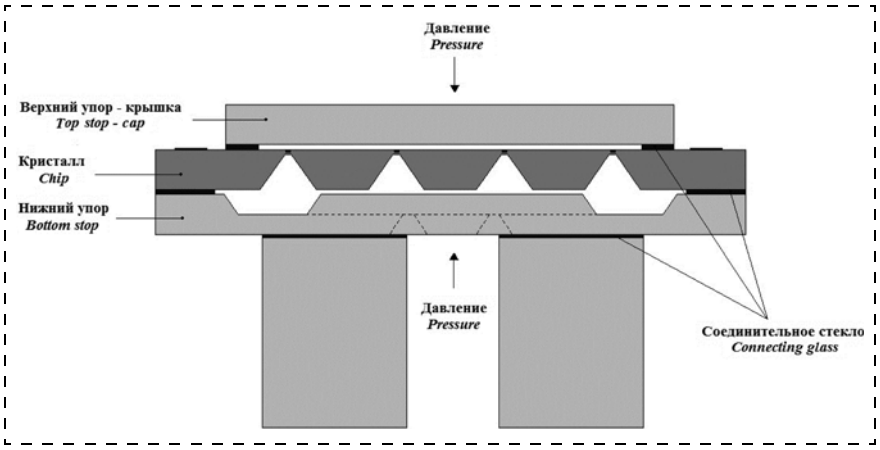


Рис. 1. Конструкция ЧЭД с упорами
Fig. 1. The construction SEP with stops

Перегрузочная способность ЧЭД, если подавать давление со стороны планарной части, существенно выше, чем при подаче давления со стороны мембраны. Это объясняется тем, что нижние и верхние упоры имеют различную форму и площадь крепления к кристаллу. Основной целью работы, результаты который приведены в статье, было повышение прочности ЧЭД за счет изменения упора относительно известных аналогов [1, 18]. Предложено упростить вид верхнего упора, используя упор в виде монолитной правильной четырехугольной призмы из кремния, и как следствие, технологический маршрут производства упора. Толщина зазора между мембраной кристалла и упором будет достигаться только за счет толщины нанесенного припойного стекла. Такое решение также упростит технологию получения необходимых зазоров без дополнительного жидкостного травления упоров для требуемого номинального давления. Области соединения верхнего упора и кристалла имеют форму разомкнутой фигуры (типа квадрат) с зазорами (прерываниями слоя стекла) по углам для измерения кристаллом дифференциального давления.

Моделирование ЧЭД с повышенной прочностью

Моделирование ЧЭД с упорами при воздействии перегрузочного давления проводили методом конечных элементов в программном пакете ANSYS [19]. Для оптимизации расчета достаточно рассмотреть геометрическую модель, состоящую только из кристалла с верхним упором.

Были использованы прямоугольные конечные элементы в форме гексаэдров размером 5...100 мкм. Для решения контактной задачи задавали фрикционный тип контакта для пары поверхностей мембрана — упор, с коэффициентом трения 0,2. При расчете задавали симметричное контактное взаимодействие без взаимного проникновения поверхностей.

При подаче давления на кристалл ЧЭД с профилированной стороны мембрана изгибается до тех пор, пока не произойдет контакт мембраны и упора. Дальнейшее повышение давления приводит к увеличению площади касания мембраны и упора и возникновению в упоре МН. Установлено, что значение прогиба мембраны, МН в ней, а соответственно и ее прочность к перегрузке, зависят от размера зазора между упором и мембраной, а также от формы упора.

Кристалл преобразователя давления имеет следующие габаритные размеры: площадь кристалла 6,15 × 6,15 мм, площадь утоненной части мембраны по внешнему контору 4,20 × 4,20 мм, толщина мембраны 35 мкм. Габаритные размеры верхнего упора 5,00 × 5,00 мм. Кристалл и верхний упор соединяются припойным стеклом в четырех областях с габаритными размерами 4,00 × 0,30 мм. Расчет геометрии верхнего упора в виде креста проводили при условии анизотропного травления фигуры на толщину $\Delta W_{тр}$ = 100 мкм в пластинах с кристаллографической плоскостью (100) в растворе едкого калия. В табл. 1 приведены результаты моделирования различных конструкций упора с зазором $W_{зазор}$ = 15 мкм при подаче перегрузочного давления на ЧЭД номинальным значением P = 1 МПа.

В ходе данных исследований установлено, что для достижения максимальной прочности ЧЭД предпочтительнее использовать монолитный упор в виде правильной четырехугольной призмы, площадь соединения с кристаллом которого идентична фигурам аналога с вытравленным крестом.

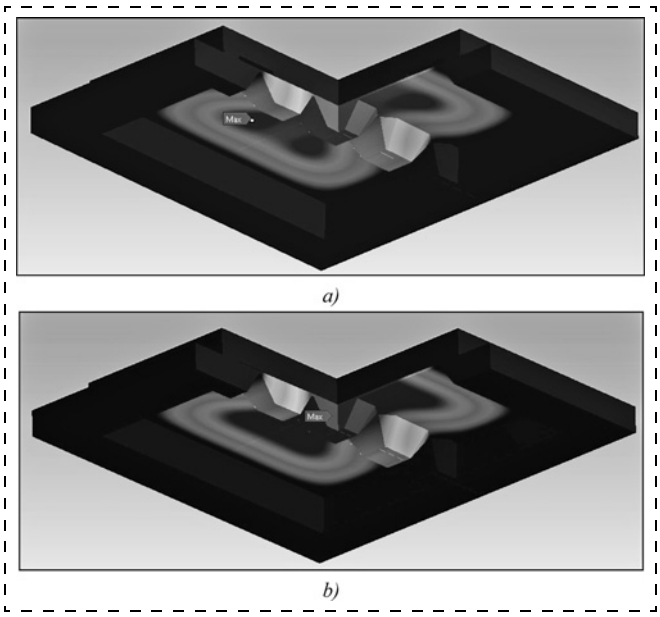


Рис. 2. Максимальное перемещение мембраны при подаче давления со стороны мембраны ЧЭД с упором в виде: *a* — креста; *b* — монолита

Fig. 2. The maximum displacement for the membrane by applied pressure for the side of membrane SIE with stop: a — cross-form; b — monolith-form

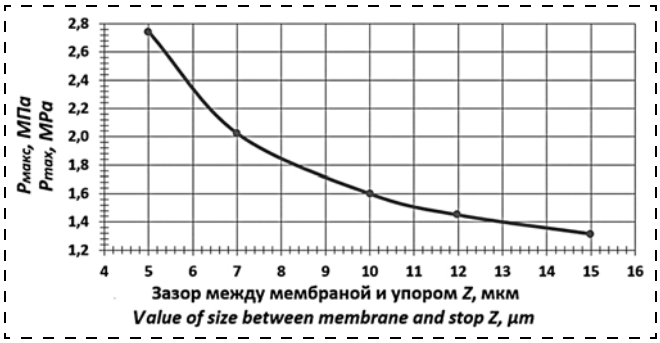


Рис. 3. Зависимость максимального перегрузочного давления от размера зазора между упором и мембраной

Fig. 3. The dependence of maximum overload pressure by value of size between membrane and monolith-form stop

Конструкция с вытравленной частью в виде креста имеет меньшую прочность за счет того, что мембрана сильнее прогибается под воздействием перегрузочного давления в вытравленной области упора (рис. 2, *a*).

Монолитный упор и мембрана имеют большую площадь соприкосновения и, соответственно, более плавное перераспределение МН с меньшим максимальным эквивалентным показателем в упоре (рис. 2, *b*). Зависимости максимальных перемещений мембраны и монолитного упора, а также МН, образующихся в мембране и в верхнем упоре при подаче давления, от размера зазора представлены в табл. 2.

Расчет проведен для монолитного упора при давлении P = 370 кПа, являющимся предельным для ЧЭД без упора. Определено, что стойкость ЧЭД к перегрузочному давлению растет с уменьшением зазора Z между упором и мембраной, т. е. чем раньше произойдет момент касания мембраны и упора, тем большее перегрузочное давление способен выдержать датчик (рис. 3). Однако необходимо, чтобы соблюдалось условие свободного передвижения мембраны в диапазоне номинального измеряемого давления (для исследуемой мембраны $P_{ном}$ = 25 кПа) и ограничения ее движения до возникновения необратимых деформаций в мембране. Для этого проведено моделирование нагрузочной характеристики стандартного ЧЭД без упора. Необратимые деформации в кремнии могут возникнуть при циклических нагрузках датчика, когда появляется эффект "усталости материала" и мембрана может разрушиться раньше предела прочности. Для монокристаллического кремния рекомендованное критическое МН по Von Mises должно быть не более σ = 500 МПа [20]. На рис. 4 приведена зависимость перемещения центра мембраны и МН в мембране от приложенного к ней давления, полученная моделированием методом конечных элементов. Расчет проведен для ЧЭД без упора.

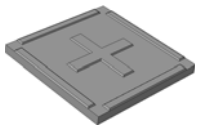
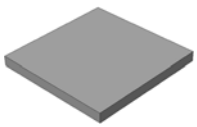
Согласно условиям работы датчика (σ < 500 МПа) и проведенным расчетам, зазор $W_{зазор}$ между упорами и кристаллом должен лежать в диапазоне

Таблица 1

Table 1

Результаты моделирования двух видов конструкций с упорами

Two types of the simulation results of constructions with stops

Параметр *Parameters*	Конструкция упора *Construction*	
	В виде креста *Cross-form stop* 	В виде монолита *Monolith-form stop* 
Максимальное перемещение мембраны Δh_m, мкм *Maximum displacement of the membrane* Δh_m, μm	25,9	15,8
Максимальное перемещение упора Δh_k, мкм *Maximum displacement of the stop* Δh_k, μm	1,1	0,86
Максимальное эквивалентное МН в мембране σ_m, МПа *Maximum equivalents MS in the membrane* σ_m, *MPa*	673	466
Максимальное эквивалентное МН в упоре σ_k, МПа *Maximum equivalents MS in the stop* σ_k, *MPa*	23,7	18,7
Коэффициент прочности *k* *Coefficient of strength k*	2,15	3,10

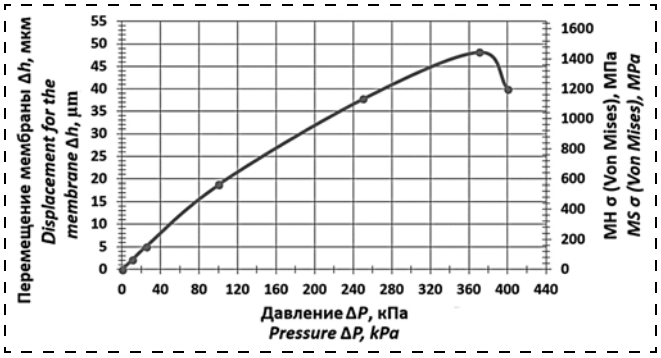


Рис. 4. Зависимость перемещения центра мембраны и МН от приложенного давления

Fig. 4. The dependence of displacement for the membrane and mechanical stress by pressure

5...17 мкм, при этом контакт мембраны и упора произойдет в диапазоне давлений P 30...90 кПа. Полученные данные можно использовать для нахождения требуемого зазора не только между кристаллом и верхним упором, но и между кристаллом и нижним упором.

В табл. 3 приведен пример расчета зависимости прочностных характеристик ЧЭД с монолитным упором от давления при $W_{зазор}$ = 7 мкм.

С ростом давления наблюдается линейный рост МН и перемещений. При P = 1800 кПа МН приближается к критическому значению в σ_m = 500 МПа, хотя и остается трехкратный запас по прочности.

Результаты экспериментов

Рассмотрена работа образцов с различными значениями зазоров между мембраной и верхними упорами разных видов.

На рис. 5 приведены результаты исследований изготовленных ЧЭД с монолитным упором для пяти среднестатистических образцов. В данной конструкции происходит линейный рост чувствительности при номинальном диапазоне давлений (до P = 25 кПа). При подаче давления со стороны мембраны ее прогиб ограничивается при P = = 30...50 кПа и зависимость выходного сигнала от давления резко снижается. При этом выходной сигнал продолжает незначительно расти, что является положительным фактором, поскольку в случаях аварийных ситуаций можно отслеживать продолжающееся воздействие перегрузочного давления. Разрушение преобразователя с монолитным упором наступает при перегрузочном давлении $P_{разр}$ = 1,55...1,75 МПа, т. е. наблюдается повышение прочности конструкции в 4...5 раз по сравнению со стандартной конструкцией ЧЭД без упора. Моделирование работы двух видов упоров было подтверждено на практике: разрушение преобразователя с упором в виде креста происходит при меньшем перегрузочном давлении P = 1,20...1,30 МПа.

На рис. 6 показана экспериментальная зависимость давления посадки мембраны на упор от высоты зазора между упором и мембраной. В табл. 4 приведены экспериментальные результаты влияния упоров на основные определяющие параметры, такие как температурный гистерезис нулевого сигнала в диапазоне температур −60...+20 °С (ТГН$^-$) и +20 °С...+80 °С (ТГН$^+$), температурный коэффициент нулевого сигнала в диапазоне температур −60...+20 °С (ТКН$^-$) и +20...+80 °С (ТКН$^+$), уход нулевого сигнала (U_0) после воздействия пе-

Таблица 2

Table 2

Зависимость механических параметров ЧЭД от размера зазора между мембраной и монолитным упором при P = 370 кПа

The dependence of mechanical parameters for SIE by value of size between membrane and monolith-form stop at P = 370 kPa

Параметр *Parameters*	Зазор между мембраной и упором, мкм *The size between membrane and stop, μm*				
	5	7	10	12	15
Максимальное перемещение мембраны Δh_m, мкм *Maximum displacement of the membrane Δh_m, μm*	5,33	7,32	10,31	12,3	15,27
Максимальное перемещение упора Δh_k, мкм *Maximum displacement of the stop Δh_k, μm*	0,33	0,32	0,31	0,30	0,27
Максимальное эквивалентное МН в мембране σ_m, МПа *Maximum equivalents MS in the membrane σ_m, MPa*	196	225	338	363	407
Максимальное эквивалентное МН в упоре σ_k, МПа *Maximum equivalents MS in the stop σ_k, MPa*	7	6,9	6,6	6,5	6,4

Таблица 3

Table 3

Зависимость основных параметров ЧЭД с монолитным упором от давления

The dependence of parameters for SIE with monolith-form stop by pressure

Параметр *Parameters*	Давление, кПа *Pressure, kPa*			
	370	1000	1500	1800
Максимальное перемещение мембраны Δh_m, мкм *Maximum displacement of the membrane Δh_m, μm*	7,32	7,89	8,33	8,6
Максимальное перемещение упора Δh_k, мкм *Maximum displacement of the stop Δh_k, μm*	0,32	0,93	1,4	1,67
Максимальное эквивалентное МН в мембране σ_m, МПа *Maximum equivalents MS in the membrane σ_m, MPa*	225	310	410	464
Максимальное эквивалентное МН в упоре σ_k, МПа *Maximum equivalents MS in the stop σ_k, MPa*	6,9	19,4	29,1	34,8
Коэффициент прочности k *Coefficient of strength k*	6,4	4,7	3,54	3

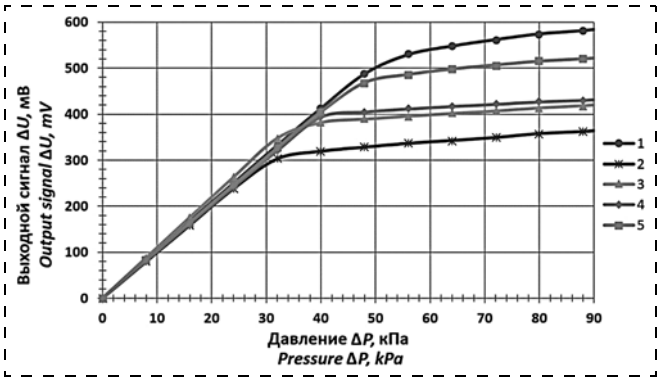


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала от приложенного давления со стороны мембраны на ЧЭД с монолитным упором (пример для пяти образцов)

Fig. 5. The dependence of output signal by pressure from the membrane side for SIE with monolith-form stop (example for 5 samples)

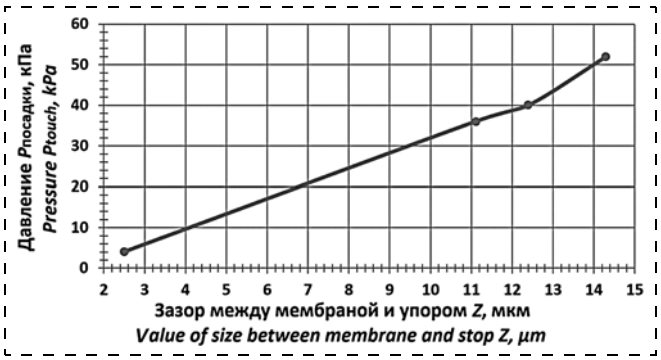


Рис. 6. Зависимость давления посадки мембраны на упор от высоты зазора между упором и мембраной

Fig. 6. The dependence of touch moment for membrane and stop by size between them

Таблица 4
Table 4

Влияние упоров на основные параметры преобразователей давления
The influence of stop by parameters SIE

Параметр *Parameters*		Вид ЧЭД *Type of SIE*	
		Без упоров *Without stops*	С упорами *With stops*
Уход U_{0P} после подачи перегрузочного давления *Changing of U_{0P} after used overload pressure*	Со стороны мембраны, % *from the side of membrane, %*	0,11	0,03
	Со стороны тензосхемы, % *from the side of circuit, %*	0,14	0,05
ТГН$^-$, % *ZTH$^-$, %*		0,13	0,21
ТГН$^+$, % *ZTH$^+$, %*		0,27	0,34
ТКН$^-$, %/10°С *TCO$^-$, %/10°C*		0,16	0,23
ТКН$^+$, %/10°С *TCO$^+$, %/10°C*		0,13	0,18
Нелинейность, % *Nonlinearity, %*		0,23	0,24
$P_{макс}$, МПа *P_{max}, MPa*		0,35	1,65

регрузочного давления, нелинейность выходного сигнала, а также максимальное давление разрушения ЧЭД ($P_{макс}$). Температурные и прочностные характеристики исследовали при наименьшем номинальном поддиапазоне давлений 1,6 кПа, нелинейность — в полном диапазоне давлений до 25 кПа.

При исследовании достаточно обширной выборки (224 образца ЧЭД с упорами) можно отметить преимущество преобразователей с упорами по прочностным характеристикам (уход нулевого сигнала при механических перегрузках U_{0P}, предельное давление разрушения ЧЭД $P_{макс}$) относительно аналога без упоров.

В то же время выявлено некритичное, но отрицательное влияние соединений дополнительного элемента на температурные характеристики (ТГН и ТКН). Нелинейность выходного сигнала для ЧЭД с упорами практически не изменилась.

Заключение

В результате проведенных исследований определена оптимальная конструкция верхнего упора в виде монолитной правильной четырехугольной призмы из кремния. Благодаря анализу разработанной математической модели и результатам измерений на полученных экспериментальных образцах доказано, что применение данного вида верхнего упора позволяет увеличить перегрузочную способность ЧЭД. Используемая технология нанесения припойного стекла в сочетании со сборочными операциями ЧЭД обеспечивают получение требуемого диапазона зазора $W_{зазор}$ = 5...17 мкм между мембраной кристалла и упорами для работы в диапазоне давлений до P = 25 кПа. Нелинейность выходного сигнала ЧЭД остается в прежних пределах погрешности. В данной разработке наблюдается увеличение прочности при подаче давления со стороны мембраны до $P_{разр}$ = 1,55...1,75 МПа, что выше показаний, полученных на стандартных конструкциях ЧЭД без упоров. Дополнительно предлагаемый вид верхнего упора может быть реализован по существенно упрощенному технологическому маршруту относительно известного прототипа.

Наличие дополнительных элементов в виде упоров снижает уход нулевого сигнала U_{0P} после подачи перегрузочного давления, так как в мембране формируются меньшие механические напряжения при остановке на упоре. В то же время необходимо продолжить исследования, чтобы снизить влияние упоров на температурные характеристики ЧЭД.

Авторы выражают благодарность Забугину Сергею Александровичу за содействие в технологическом аспекте реализации сборочной конструкции ЧЭД.

Список литературы

1. **Суханов В. С., Данилова Н. Л., Панков В. В.** Микроэлектронный датчик давления с чувствительным элементом, защищенным от перегрузки. Патент РФ. 2015. RU2564376 C1. 14 с.

2. **Тиняков Ю. Н., Андреев К. А., Цивинская Т. А., Гусляев Д. В.** Датчик давления. Патент РФ. 2015. RU2559300 C2. 7 с.

3. **Ушков А. В., Козлов А. Н.** Проектирование, изготовление и исследование кремниевых чувствительных элементов давления со встроенной защитой от перегрузок // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 5. С. 49—51.

4. **Meng X., Zhao Y.** The design and optimization of a highly sensitive and overload-resistant piezoresistive pressure sensor // MDPI "Sensors". 2016. Vol. 16. N. 348. P. 1—12. DOI: 10.3390/s16030348.

5. **Christel L., Petersen K., Barth P., Pourahmadi F., Mallon J., Bryzek J.** Single-crystal Silicon Pressure Sensors with 500x Overpressure Protection // Sensors and Actuators A. 1990. N. A21—A23. P. 84—88.

6. **Seto Y., Tokuda T.** Pressure sensor chip // Patent USA. 2013. US 0239694 A1. 6 c.

7. **Землянников Н. С., Данилова Н. Л., Панков В. В., Суханов В. С., Гаврилов Р. О., Михайлов Ю. А.** Конструкция чувствительных элементов на малые давления с повышенной перегрузочной способностью // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 6. С. 8—10.

8. **Fournier S., Chappel E.** Modeling of a Piezoelectric MEMS Micropump Dedicated to Insulin Delivery and Experimental Validation Using Integrated Pressure Sensors: Application to Partial Occlusion Management // Journal of Sensors. 2017. Vol. 2017. P. 1—7. DOI: 10.1155/2017/3719853.

9. **Wu X.-P.** A New Pressure Sensor with Innercompensation for Nonlinearity and Protection to Overpressure // Sensors and Actuators A. 1990. Vol. 21. P. 65—69. DOI: 10.1016/0924-4247(90)85013-T.

10. **Schneeberger N., Allendes R., Bianchi F., Chappel E., Conan C., Gamper S., Schlund M.** Drug Delivery Micropump with Built-In Monitoring // Proceedings of the Eurosensors XXIII conference. 2009. P. 1339—1342. DOI: 10.1016/j.proche.2009.07.334.

11. **Yifang L., Daner C., Liwei1 L., Gaofeng Z., Jianyi Z., Lingyun W., Daoheng S.** Glass frit bonding with controlled width and height using a two-step wet silicon etching procedure // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2016. N. 26. Article 035018. DOI: 10.1088/0960-1317/26/3/035018.

12. **Sandvand A., Halvorsen E., Aasmundtveit K. E., Jakobsen H.** Influence of glass-frit material distribution on the performance of precision piezoresistive MEMS pressure sensors // IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology. 2015. Vol. 5, N. 1. P. 1559—1566.

13. **Sinev L. S., Ryabov V. T.** Reducing thermal mismatch stress in anodically bonded silicon-glass wafers: theoretical estimation // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS. 2017. Vol. 16, N. 1. P. 015003-1—015003-5. DOI: 10.1117/1.JMM.16.1.015003.

14. **Басов М. В., Пригодский Д. М., Холодков Д. А.** Моделирование чувствительного элемента датчика давления на основе биполярного тензотранзистора // Датчики и системы. 2017. № 6. С. 17—24.

15. **Басов М. В., Пригодский Д. М.** Исследование чувствительного элемента датчика давления на основе биполярного тензотранзистора // Нано- и микросистемная техника. 2017. Том 19, № 11. С. 685—693. DOI: 10.17587/nmst. 19.685-693.

16. **Басов М. В., Химушкин Б. И., Холодков Д. А.** Интегральный чувствительный элемент преобразователя давления на основе биполярного транзистора. Патент РФ. 2017. RU174159 U1. 14 с.

17. **Землянников Н. С., Данилова Н. Л., Панков В. В., Суханов В. С., Михайлов Ю. А.** Тензорезистивные преобразователи давления на основе сложнопрофилированных кремниевых мембран // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 4. С. 32—36.

18. **Wade R.** Pressure sensor with overpressure protection. Patent USA. 2016. US 9410861 B2. 17 p.

19. **Furlan H., Fraga M. A., Koberstein L. L., Rasia L. A.** Modeling of MEMS Piezoresistive Sensors // Chapter in book: Mathematical Modeling Applied to Problem Solving in Engineering. Ediotora da Unijui. 2012. 17 c.

20. **Унтилов А. А.** Исследование и разработка упругого подвеса чувствительного элемента микромеханического гироскопа. Диссертация канд. техн. наук. 2005. Санкт-Петербург. 14 с.

D. M. Prigodskiy, Engineer-researcher, dprigodskyi@gmail.com,
M. V. Basov, Engineer, basov.vniia@gmail.com,
Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, 127055, Russian Federation

Corresponding author:
Basov Mikhail V., Engineer, Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, 127055, Russian Federation, basov.vniia@gmail.com

Research of Pressure Sensitive Elements with Increased Strength

Received on February 01, 2019
Accepted on February 27, 2019

The paper presents the design of a silicon pressure sensitive elements (SEP) with stops. Stops are providing resistance of overload pressure. The advantage of stops was proved. The required size between the membrane and stops for working displacement of the membrane was determined. The results of researching parameters for samples with increased strength have been described. SEP is working in the range from 1.6 to 25.0 kPa. Elements can increase overload strength in 5X times compared standard design SEP without stops.

Keywords: *pressure sensitive elements, Wheatstone bridge circuit, overload pressure, stops, zero signal temperature coefficient (TCZ), zero signal hysteresis temperature (THZ), finite element method*

For citation:
Prigodskiy D. M., **Basov M. V.** Research of Pressure Sensitive Elements with Increased Strength, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 6, pp. 368—376.

DOI: 10.17587/nmst.21.368-376

Introduction

Improving the strength properties of primary pressure transducers is an important task in the development of pressure sensors [1—6], especially for measuring low pressures from 1 kPa, when the most fragile element of a SEP (silicon membrane) is subjected to significant overloads during the pressure sensors assembly housing and during operation the device.

The investigated design of the SEP with increased resistance to overload pressure includes a profiled silicon die with a strain gauge bridge measuring circuit, an upper cover with a stop (upper stop), a gasket with a stop (lower stop) and the base. The die membrane, formed by anisotropic wet etching, has a square shape with a complex profiled geometry of mechanical stress concentrators (MS) in the form of rigid centers. All components of the SEP are made of silicon and are connected by low-temperature solder glass [7], although other methods of connected is knowing in the papers [8—10]. When an overload pressure is applied to the SEP, the silicon die membrane touch the stop: when pressure is applied from the side of the membrane, the planar part of the die touches the upper stop; when pressure is applied from the planar part's side, the rigid centers of the membrane touch the lower stop. At the same time, the distance between the die membrane and the stops should ensure the free bending of the die membrane at nominal pressure. The specified distances are regulated by the thickness of the solder glass seam. This design is the most technologically advanced in the manufacture and by means of automating the deposition process, it is possible with enough accuracy and repeatability to plating solder glass on the stops [11]. Low-quality plating technology can lead to solder glass getting on the front or profiled side of the die, critical areas of the gasket and the top stop. This problem can lead to a premature landing on stops or the beginning of parasitic MS, which ultimately can cause an increase in the basic and additional uncertainties of the pressure transducer [12, 13]. There are alternative solutions for increasing the strength by using an ultrasensitive circuit based on a bipolar strain-sensitive transistor [14—16], which over the long term make it possible to achieve increased strength of the SEP without the use of stops, under several conditions. However, this task is not so simple and at the present moment, this work of the design and research a pressure sensor die continues.

SEP construction with increased strength

The top stop from mechanical overload is the silicon part, which is attached to the die symmetrically on four sides. The upper stop has an area smaller than the die for attaching to the contact pads.

The bottom stop from mechanical overload is a silicon gasket with integrated stops. The stops are integrated into the silicon gasket and are made in the same process along with gasket by the method of silicon's anisotropic etching (figure 1).

In response to such an optimal solution, in comparison with the standard design of the SEP [17], the gasket design with stops has a strength 10X times higher under the influence of the die's planar part.

The overload property of the SEP, during pressure supply from the side of the planar part, is significantly higher than when the pressure is supplied from the side of the membrane. This is explained by the fact that the lower and upper stops have a different shape and area of attachment to the die. The main purpose of the work was to increase the strength of the SEP by changing the stop comparative to the well-known analogues [1, 18]. It was proposed to simplify the upper stop using the stop in the form of a monolithic regular quadrangular prism made of silicon, and, as a result, the technological process of the stop's production. The thickness of the gap between the die's membrane and the stop will be achieved only due to the thickness of the plating solder glass. This solution will also simplify the technology for obtaining the necessary gaps without additional wet etching of the stops for the required nominal pressure. The areas of connection the stop's upper and the die have an open figure (such as a square) with gaps (interruptions of the glass layer) at the corners for measuring the differential pressure by the die.

Simulation SEP with increased strength

The simulation of the SEP with stops under the influence of overload pressure was carried out by the finite element method in the ANSYS software package [19]. To optimize the calculation, it suffices to consider a geometric model consisting only of a die with an upper stop.

Rectangular finite elements in the form of hexahedra ranging in size from 5 to 100 μm were used. To solve the contact problem, the frictional type of contact for a pair of membrane — stop surfaces with a friction coefficient of 0.2 was set. While calculating, a symmetric contact interaction was specified without surfaces interpenetration.

When applying pressure on the die's SEP from the profiled side, the membrane bends until contact of the membrane and the stop. A further increase in pressure leads to an increase in the contact area of the membrane and stop and the initiation of an MS in stop. It has been established that the magnitude of the membrane's deflection, the magnitude of MS in membrane and, accordingly, membrane's strength to overload, depend on the size of the gap between the stop and the membrane, and on the shape of the stop.

The pressure transducer die has the following overall dimensions: the die area is 6.15 × 6.15 mm, the area of the thinned part of the membrane is 4.20 × 4.20 mm, the thickness of the membrane is 35 μm. Overall di-

mensions of the upper stop 5.0 × 5.0 mm. The die and the top stop are connected by solder glass in four areas with dimensions of 4.00 × 0.30 mm. The calculation of the upper stop's geometry in the form of a cross was carried out under the condition of anisotropic etching of the figure by thickness $\Delta W = 100$ μm in wafers with a crystallographic plane (100) in a solution of potassium hydroxide. Table 1 shows the results of modeling various designs of the stop with a gap $W_{gap} = 15$ μm when overload pressure is applied to the SEP with a nominal value of $P = 1$ MPa. It was established that to achieve the maximum SEP's strength, it is preferable to use a monolithic stop in the form of a regular quadrangular prism, the connection's area with the die of which is identical to the same figures with an etched cross. The design with the etched part in the form of a cross has less strength, because the membrane bends more strongly under the influence of overload pressure in the stop's etched area (fig. 2, *a*).

The monolithic stop and the membrane have a larger area of contact and, accordingly, a smoother redistribution of MS with a lower maximum equivalent indicator in the stop (fig. 2, *b*). The dependences of the maximum displacements of the membrane and the monolithic stop, the MS formed in the membrane and the upper stop when the pressure is applied, are presented in Table 2. The calculation was performed for a monolithic stop with pressure $P = 370$ kPa, which is the limit for the SEP without a stop.

It has been determined that the strength of the SEP to overload pressure increases with decreasing gap Z between the stop and the membrane, that is, the earlier the contact of the membrane and the stop occurs, the greater the overload pressure the sensor can withstand (Fig. 3). However, it is necessary to observe the condition of free membrane's movement in the range of the nominal measured pressure (for the investigate membrane $P_{nom} = 25$ kPa) and restriction of its movement until irreversible deformations occur in the membrane. For this purpose, the simulation of the load characteristics of the standard SEP without a stop was carried out. Irreversible deformations in silicon can occur under cyclic loads of the sensor, when the effect of "material fatigue" appears and the membrane can be destroyed before the tensile strength. For monocrystalline silicon, the recommended critical stress should be no more than $\sigma = 500$ MPa [20]. Figure 4 shows the dependence of the displacement membrane's center and the MS in the membrane when pressure is applied, obtained by modeling using the method of finite elements. The calculation was carried out for SEP without a stop. According to the sensor operation conditions ($\sigma < 500$ MPa) and the calculations made, the gap W gap between the stops and the die should be in the range from 5 to 17 μm, while the contact between the membrane and the stop will occur in the pressure range P from 30 to 90 kPa. The obtained data can be used not only to find the required gap between the die and the upper stop, but also between the die and the lower stop.

Table 3 shows an example of the calculation strength's dependence characteristics of a SEP with a monolithic stop on pressure at $W = 7$ μm.

With increasing pressure, linear growth of MS and displacements is observed. At $P = 1800$ kPa, the MS approaches to the critical value of $\sigma = 500$ MPa, although a threefold safety margin remains.

Experimental results

The work of samples with different gaps' sizes between the membrane and the upper stops of different types is considered.

Figure 5 shows the studies' results of manufactured SEP with monolithic stop for five average samples. In this design, a linear increase in sensitivity occurs at a nominal pressure range (up to $P = 25$ kPa). When applying pressure from the membrane, its deflection is limited at $P = 30...50$ kPa and the dependence of the output signal on pressure decreases sharply. At the same time, the output signal continues to grow slightly, which is a positive factor, since in case of emergency situations it is possible to monitor the continuing impact of overload pressure. The destruction of the transducer with a monolithic stop occurs at overload pressure $P = 1.55...1.75$ MPa, i.e. there is an increase in structural strength of 4...5 times compared with the standard design of the SEP without a stop. The modeling of these stops' types was confirmed in practice: the destruction of the transducer with a stop in the form of a cross occurs at a lower overload pressure $P = 1.20...1.30$ MPa.

Figure 6 shows the experimental dependence of the membrane landing on the stop on the gap between the stop and the membrane. Table 4 shows the experimental results of the stops' influence on the main parameters, such as the temperature hysteresis of the zero signal in the temperature range from minus 60 to 20 °C (THZ^-) and from 20 to 80 °C (THZ^+), the temperature coefficient of the zero signal in the temperature range from minus 60 to 20 °C (TCZ^-) and from 20 to 80 °C (TCZ^+), the offsetting of the zero signal (U_0) after exposure to overload pressure, nonlinearity of the output signal and the maximum fracture pressure of the SEP (P_{max}). The temperature and strength characteristics were studied at the lowest nominal pressure 1.6 kPa, nonlinearity — in the full pressure range up to 25 kPa. In the study of an extensive series (224 SEP samples with stops), it is possible to note the advantage of transducers with stops according to the strength characteristics (the offsetting of the zero signal under mechanical overloads U_{0P}, limiting fracture pressure SEP P_{max}) relative to the transducers without stops.

At the same time, an uncritical, but negative effect of the additional element bonding on the temperature

characteristics (THZ and TCZ) was revealed. The nonlinearity of the output signal for SEP with the stops almost unchanged.

Conclusion

As a result of the research, the optimal upper stop's design in the form of a monolithic regular rectangular silicon prism was determined. In response to the analysis of the developed mathematical model and the results of measurements on the obtained experimental samples, it was proved that the use of this type of upper stop allows increasing the overload capacity of the SEP. The technology used for applying solder glass provides in combination with the assembly operations of the SEP, obtaining the required gap range W_{gap} = 5...17 μm between the membrane die and the stops for work in the pressure range up to P = 25 kPa. The nonlinearity of the output signal SEP remains in the previous limits of uncertainties. In this development, an increase in strength is observed when pressure is applied from the side of the membrane to P = 1.55...1.75 MPa, which is higher than the readings obtained on standard SEP structures without stops. Additionally, the proposed type of upper stop can be implemented on a substantially simplified technological route relative to the well-known prototype.

Additional elements in the form of stops reduces the zero signal's U_{0P} offsetting after applying overload pressure, since in the membrane, fewer mechanical stresses are formed when stay at the stop. At the same time, it is necessary to continue research in order to reduce the influence of the stops on the temperature characteristics of the SEP.

The authors express their gratitude to Sergei Zabugin for his technological assistance in development of the SEP.

References

1. **Suhanov V. S., Danilova N. L., Pankov V. V.** Mikroehlektronnyj datchik davleniya s chuvstvitel'nym ehlementom, zashchishchennym ot peregruzki. Patent RF, 2015, RU2564376 C1, pp. 1—14 (in Russian).

2. **Tinyakov Yu. N., Andreev K. A., Civinskaya T. A., Guslyaev D. V.** Datchik davleniya, Patent RF, 2015, RU2559300 C2, pp. 1—7 (in Russian)

3. **Ushkov A. V., Kozlov A. N.** Proektirovanie, izgotovlenie i issledovanie kremnievyh chuvstvi-tel'nyh ehlementov davleniya so vstroennoj zashchitoj ot peregruzok, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2007, no. 5, pp. 49—51 (in Russian)

4. **Meng X., Zhao Y.** The design and optimization of a highly sensitive and overload-resistant piezoresistive pressure sensor, *MDPI "Sensors"*, 2016, vol. 16, no. 348, pp. 1—12. DOI: 10.3390/s16030348

5. **Christel L., Petersen K., Barth P., Pourahmadi F., Mallon J., Bryzek J.** Single-crystal Silicon Pressure Sensors with 500× Overpressure Protection, *Sensors and Actuators A*, 1990, no. A21—A23, pp. 84—88.

6. **Seto Y., Tokuda T.** Pressure sensor chip, Patent USA, 2013, US 0239694 A1, pp. 1—6.

7. **Zemlyannikov N. S., Danilova N. L., Pankov V. V., Suhanov V. S., Gavrilov R. O., Mihajlov Yu. A.** Konstrukciya chuvstvitel'nyh ehlementov na malye davleniya s povyshennoj peregruzochnoj sposobnost'yu, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 6, pp. 8—10 (in Russian)

8. **Fournier S., Chappel E.** Modeling of a Piezoelectric MEMS Micropump Dedicated to Insulin Delivery and Experimental Validation Using Integrated Pressure Sensors: Application to Partial Occlusion Management, *Journal of Sensors*, 2017, vol. 2017, pp. 1—7. doi.org/10.1155/2017/3719853.

9. **Wu X.-P.** A New Pressure Sensor with Innercompensation for Nonlinearity and Protection to Overpressure, *Sensors and Actuators A*, 1990, vol. 21, pp. 65—69. doi.org/10.1016/0924-4247(90)85013-T.

10. **Schneeberger N., Allendes R., Bianchi F., Chappel E., Conan C., Gamper S., Schlund M.** Drug Delivery Micropump with Built-In Monitoring, *Proceedings of the Eurosensors XXIII conference*, 2009, pp. 1339—1342. doi: 10.1016/j.proche.2009.07.334

11. **Yifang L., Daner C., Liwei1 L., Gaofeng Z., Jianyi Z., Lingyun W., Daoheng S.** Glass frit bonding with controlled width and height using a two-step wet silicon etching procedure, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, no. 26. DOI: 10.1088/0960-1317/26/3/035018.

12. **Sandvand A., Halvorsen E., Aasmundtveit K. E., Jakobsen H.** Influence of glass-frit material distribution on the performance of precision piezoresistive MEMS pressure sensors, *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2015, vol. 5, no. 11, pp. 1559—1566.

13. **Sinev L. S., Ryabov V. T.** Reducing thermal mismatch stress in anodically bonded silicon-glass wafers: theoretical estimation, *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 015003-1—015003-5. DOI: 10.1117/1.JMM.16.1.015003.

14. **Basov M. V., Prigodskiy D. M., Holodkov D. A.** Modelirovanie chuvstvitel'nogo ehlementa datchika davleniya na osnove bipolyarnogo tenzotranzistora, *Datchiki i sistemy*, 2017, no. 6, pp. 17—24 (in Russian)

15. **Basov M. V., Prigodskiy D. M.** Issledovanie chuvstvitel'nogo ehlementa datchika davleniya na osnove bipolyarnogo tenzotranzistora, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 11, pp. 685—693. DOI: 10.17587/nmst. 19.685-693 (in Russian)

16. **Basov M. V., Khimushkin B. I., Holodkov D. A.** Integral'nyj chuvstvitel'nyj ehlement preobrazovatelya davleniya na osnove bipolyarnogo tranzistora, Patent RF. 2017. RU174159 U1, pp. 1—14 (in Russian)

17. **Zemlyannikov N. S., Danilova N. L., Pankov V. V., Suhanov V. S., Mihajlov Yu. A.** Tenzorezistivnye preobrazovateli davleniya na osnove slozhnoprofilirovannyh kremnievyh membran, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 4, pp. 32—36 (in Russian)

18. **Wade R.** Pressure sensor with overpressure protection. Patent USA, 2016, US 9410861 B2, pp. 1—17.

19. **Furlan H., Fraga M. A., Koberstein L. L., Rasia L. A.** Modeling of MEMS Piezoresistive Sensors, *Chapter in book: Mathematical Modeling Applied to Problem Solving in Engineering.* Ediotora da Unijui, 2012, pp. 1—17.

20. **Untilov A. A.** Issledovanie i razrabotka uprugogo podvesa chuvstvitel'nogo ehlementa mikromekhanicheskogo giroskopa, Dis. kandidata tekhnicheskih nauk, 2005, Sankt-Peterburg, 14 p. (in Russian)