



УДК 621.372  
doi:10.21685/2587-7704-2021-6-2-5



Open  
Access

RESEARCH  
ARTICLE

## Профилированный чувствительный элемент для датчика давления

**Елизавета Анатольевна Рыблова**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
Elizaveta.ryblova@mail.ru

**Аннотация.** Целью исследования является разработка полупроводникового чувствительного элемента для датчика давления на основе тензорезистивного эффекта в виде профилированной мембраны с повышенной чувствительностью. Определены оптимальные геометрические характеристики сечения профилированной мембраны полупроводникового тензопреобразователя давления для достижения максимальной чувствительности преобразования и снижения погрешности линейности выходного сигнала. Для исследования влияния геометрических параметров сечения мембраны на характеристики преобразователя создана имитационная модель полупроводникового чувствительного элемента датчика давления в программном пакете COMSOL Multiphysics. Определены геометрические параметры сечения профилированной мембраны, обеспечивающие повышенную чувствительность и сниженную погрешность линейности выходного сигнала.

**Ключевые слова:** полупроводниковый датчик давления, чувствительный элемент, кремниевая мембрана, радиальное и тангенциальное механическое напряжение, имитационное моделирование

**Для цитирования:** Рыблова Е. А. Профилированный чувствительный элемент для датчика давления // Инжиниринг и технологии. 2021. Т. 6(2). С. 1–4. doi:10.21685/2587-7704-2021-6-2-5

## Profiled sensing element for pressure transducer

**Elizaveta A. Ryblova**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
Elizaveta.ryblova@mail.ru

**Abstract.** The aim of the research is to develop a semiconductor sensing element for a pressure transducer based on the tensoresistive effect in the form of a profiled membrane with increased sensitivity. The optimal geometric characteristics of the cross-section of the profiled membrane of a semiconductor pressure strain gauge are determined to achieve maximum conversion sensitivity and reduce the linearity error of the output signal. To study the influence of geometric parameters of the membrane cross-section on the characteristics of the converter, a simulation model for the semiconductor sensing element of the pressure transducer was created using COMSOL Multiphysics software package. The geometric parameters of the cross-section of the profiled membrane which provide increased sensitivity and reduced linearity error of the output signal are determined.

**Keywords:** semiconductor pressure transducer, sensing element, silicon membrane, radial and tangential mechanical stress, simulation modeling

**For citation:** Ryblova E.A. Profiled sensing element for pressure transducer. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2021;6(2):1–4. (In Russ.). doi:10.21685/2587-7704-2021-6-2-5

Распространенными типами чувствительных элементов (ЧЭ) для датчиков давления являются полупроводниковые чувствительные элементы тензорезистивного типа. Наиболее часто в конструкциях тензопреобразователей используются плоские мембраны и мембраны с жестким центром. При уменьшении толщины мембран обеспечивается более высокая чувствительность. Однако уменьшать толщину чувствительного элемента можно только до определенных пределов, ограничи-



ваемых технологий изготовления и воспроизводимостью толщины мембраны. Кроме того, при уменьшении толщины мембраны существенно увеличивается нелинейность зависимости механического напряжения от приложенного давления, а следовательно, и нелинейность функции преобразования. Некоторое увеличение выходного сигнала и линейности функции преобразования обеспечивают мембраны с жестким центром, однако их существенным недостатком является чувствительность к ударам и вибрациям, при которых жесткий центр ведет себя подобно инерционной массе, что обеспечивает значительную дополнительную погрешность. В данном проекте решается актуальная проблема разработки усовершенствованной конструкции чувствительного элемента датчика давления, позволяющая повысить чувствительность и снизить погрешность линейности выходного сигнала [1].

Для определения оптимальной формы мембраны, удовлетворяющей таким требованиям, как высокая чувствительность и линейность выходного сигнала, было проведено моделирование полупроводниковых мембран переменной толщины с профилем, сочетающим широкие и узкие участки. Для снижения требований к вычислительной мощности персонального компьютера были построены двухмерные модели профилей мембран в программном пакете COMSOL Multiphysics. Методом конечных элементов было смоделировано напряженно-деформированное состояние мембраны под воздействием приложенного давления.

Для исследования были выбраны два ЧЭ, сечения которых представляют собой сочетания широких и узких участков с соотношением ширины 3:1 (данное соотношение было взято за основу у одного из аналогов, ЧЭ переменной толщины US Pat. No. 4236137). Однако в документе US Pat. No. 4236137 не приведено точных габаритных размеров мембраны [2]. Поэтому предложенные геометрические параметры выбирались исходя из приведенного схематического рисунка с условием, чтобы радиус ЧЭ не превышал 1,5 мм. Значение приложенного давления 0,2 МПа выбрано из условия, чтобы эквивалентное напряжение по Мизесу не превышало 350 МПа и не вызывало разрушения мембраны. На рис. 1 и 2 приведены эскизы чувствительных элементов.

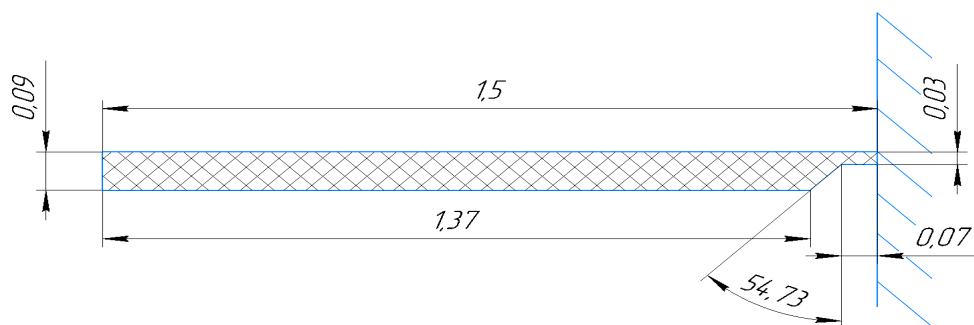


Рис. 1. Профиль ЧЭ из US Pat. No. 4236137

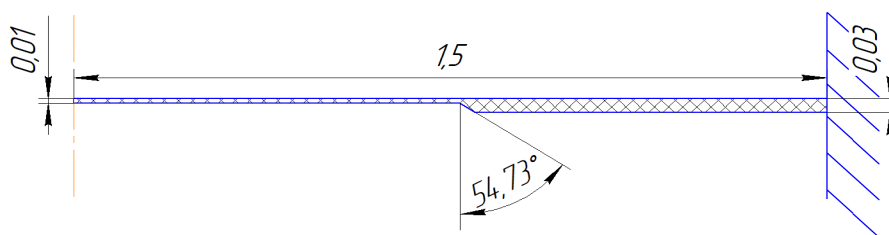


Рис. 2. Профиль ЧЭ предложенной конструкции

По результатам численного моделирования были определены напряжения по Мизесу для уже известной мембраны (см. рис. 1). Оно составило 150 МПа, а у предложенной конструкции (см. рис. 2) – 330 МПа.

Следующим этапом в выборе оптимальных параметров мембраны является определение чувствительности. Выходной сигнал ЧЭ с мостовой схемой пропорционален разности радиального и тангенциального напряжений, поэтому рассматривается зависимость разности напряжений от приложенного давления.

Чувствительность преобразования давления в механическое напряжение в данном случае будет определяться по графику зависимости разности напряжений от приложенного давления на расстоянии, равном половине длины тензорезистора, от жесткой заделки мембраны. Из технологических



ограничений минимальное значение длины принято равным 100 мкм. Это позволяет учесть конечную длину тензорезистора (т.е. рассматривается разность радиального и тангенциального напряжений в центре полоскового тензорезистора). На рис. 3 представлен график зависимости разности напряжений от приложенного давления для известной мембраны (US Pat. No. 4236137) и предложенной конструкции.

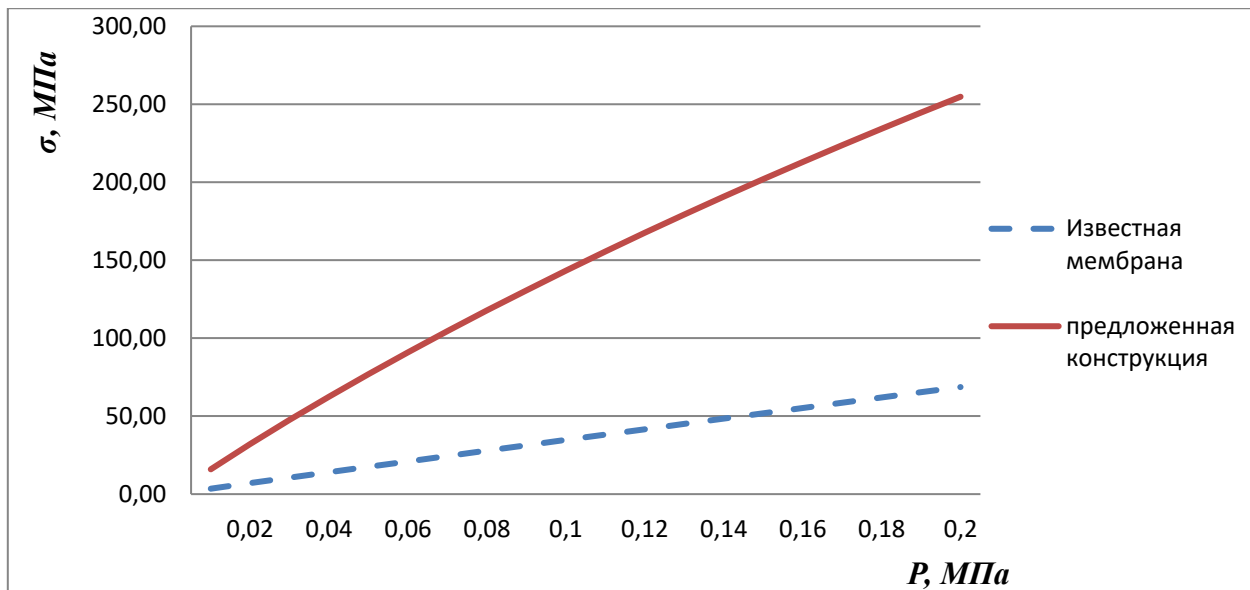


Рис. 3. Зависимость разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления для известной мембраны (пунктирная линия) и предложенной конструкции (сплошная линия)

Численное значение чувствительности  $S$  рассчитывалось по следующей формуле:

$$S = \frac{\sigma_r - \sigma_t}{P}, \quad (1)$$

где  $\sigma_r$  – радиальное механическое напряжение;  $\sigma_t$  – тангенциальное механическое напряжение;  $P$  – приложенное давление [3].

Значение чувствительности уже известной мембраны составило  $S = 325$ , предложенной конструкции  $S = 1250$ .

Для каждой из мембран был проведен расчет погрешности линейности, максимальной разности погрешностей предложенной конструкции и известной мембраны, а также выигрыш в напряжении предложенной конструкции в сравнении с известной мембраной (табл. 1).

Таблица 1

Результаты сравнения мембран

Выигрыш в напряжении, %	Максимальная разность погрешностей	Максимальная погрешность известной мембраны	Максимальная погрешность предложенной конструкции
281,55	3,59	0,34	3,93

Из табл. 1 видно, что предложенная конструкция имеет преимущество – повышенную чувствительность, однако имеет сравнительно большую погрешность линейности выходного сигнала – почти 4 %. Для определения, при какой координате ступеньки предложенная конструкция имеет наибольшую чувствительность, было проведено моделирование и построены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжения от координаты ступеньки, под которой понимается переход от узкого участка к широкому. Для начала были заданы следующие параметры: соотношение толщины широкого и узкого участков (3:1), а координата ступеньки изменялась от 0,6 до 1,2 мм от центра мембраны с шагом 0,05 мм. Для каждого случая был построен график зависимости разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления, на основе которых была построена зависимость разности радиального и тангенциального напряжений от координаты ступеньки (рис. 4).

Из полученных данных видно, что наилучшая чувствительность соответствует мембране с координатой ступеньки 0,95 мм (0,63 относительных единицы) от центра.

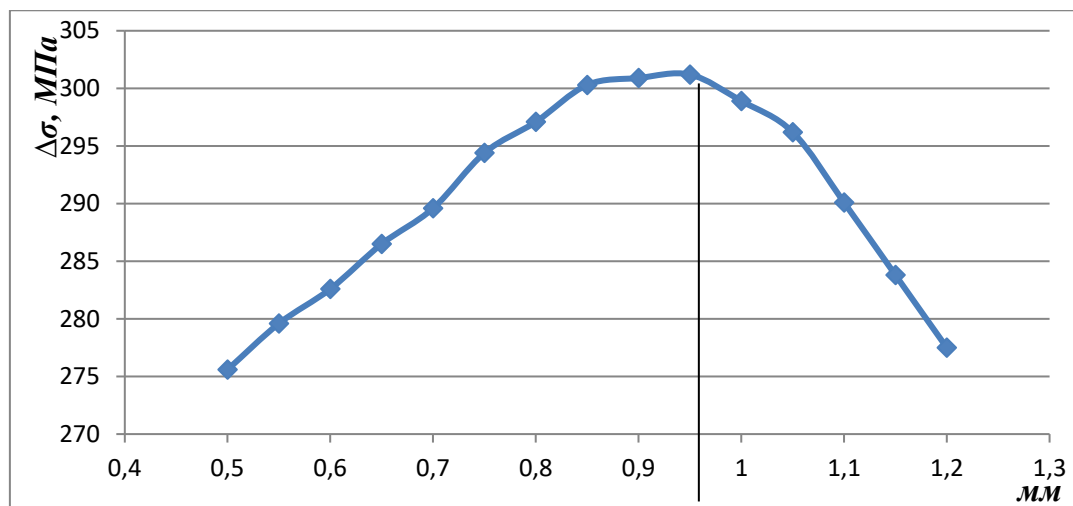


Рис. 4. Зависимость разности радиального и тангенциального напряжения от координаты ступеньки

Было проведено сравнение предложенной конструкции с плоской мембраной такого же радиуса 1,5 мм и толщиной 30 мкм, равной толщине широкого участка профилированной мембраны и с мембраной из патента US Pat. No. 4236137. Для каждой из мембран была рассчитана чувствительность и погрешность линейности, данные сведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип мембраны	Погрешность линейности	Чувствительность
Предложенная конструкция	3,33 %	1505,85
Плоская мембрана	2,88 %	1118,60
Мембрана из патента	4,98 %	707,14

Из табл. 2 видно, что наилучшая чувствительность у предложенной конструкции, однако погрешность линейности значительно выше, чем у плоской мембраны. Дальнейшее исследование геометрических параметров профилированного чувствительного элемента направлено на снижение погрешности линейности.

### Список литературы

1. Волков В. С., Рыблова Е. А. Полупроводниковый тензочувствительный элемент с улучшенными характеристиками // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 55-летию образования кафедры «Автоматика и телемеханика» : в 2 т. Пенза : Изд-во ПГУ, 2019.
2. Kurtz A. D, Mallon J. R., Nunn T. A. Semiconductor transducers employing flexure frames. US Patent No. US4236137A, 1980.
3. Aravamudhan Sh. Development of micro/nanosensor elements and packaging techniques for oceanography. University of South Florida: Scholar Commons, 2007.

### References

1. Volkov V.S., Ryblova E.A. Advanced semiconductor strain gauge element. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy 55-letiyu obrazovaniya kafedry «Avtomatika i telemekhanika»: v 2 t.* = *Problems of Automation and Control in Technical Systems: Proceedings of XXXIII International Scientific and Technical Conference, dedicated to the 55th anniversary of the formation of Automation and Telemechanics Department: in 2 volumes.* Penza: Izd-vo PGU, 2019.
2. Kurtz A.D, Mallon J.R., Nunn T.A. *Semiconductor transducers employing flexure frames.* US Patent No. US4236137A, 1980.
3. Aravamudhan Sh. *Development of micro/nanosensor elements and packaging techniques for oceanography.* University of South Florida: Scholar Commons, 2007.

Поступила в редакцию / Received 23.05.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 25.06.2021

Принята к публикации / Accepted 05.07.2021